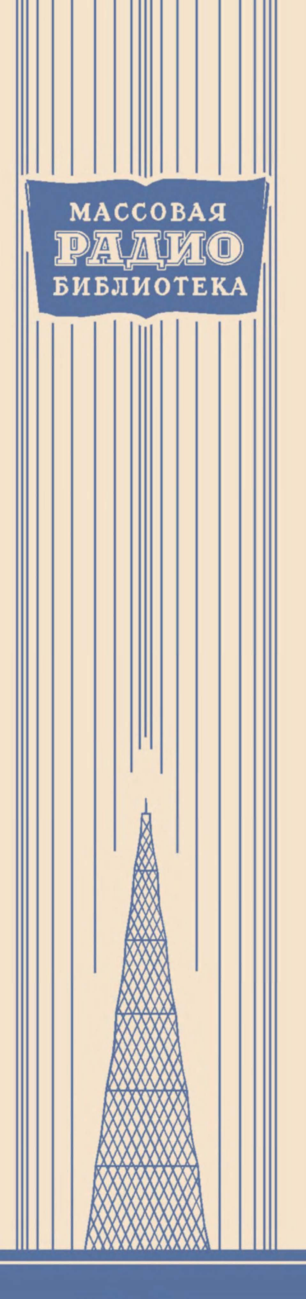


А. М. БРОЙДЕ

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ





ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 301

А. М. БРОЙДЕ

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1958 ЛЕНИНГРАД

В брошюре освещены вкратце основные этапы развития ламповой и полупроводниковой электроники со времени ее возникновения и до наших дней. Рассмотрен современный технический уровень электроники, намечены ближайшие перспективы ее развития и охарактеризованы современные типы электровакуумных и полупроводниковых приборов. Подчеркнуто быстрое развитие и совершенствование электроники и отмечено, что оба современных направления ее—электронная лампа и полупроводниковый прибор во многих случаях взаимодействуют друг с другом в решении общих задач.

Брошюра предназначена для подготовленного читателя (радиоинженера, техника и квалифицированного радиолюбителя).

Автор — *Бройде Абрам Маркович*

ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

Редактор *Е. А. Левитин* Технич. редактор *Н. И. Борнов*

Сдано в набор 11/IV 1958 г. Подписано к печати 10/V 1958 г.
Т-04589. Бумага 84 × 108¹/₃₂. 4,1 печ. л. Уч.-изд. л. 4,5.
Тираж 75 000 экз. Цена 1р. 80 к. Заказ № 1182.

Москва. Типография Госэнергоиздата, Шлюзовая наб., 10

1. РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

Современная радиоэлектроника является одной из наиболее многосторонних отраслей науки и техники. Если до второй мировой войны с радиоэлектроникой связывались главным образом успехи радиосвязи, радиовещания и частично телевидения, то после войны и особенно в последнее десятилетие применение радиоэлектроники открыло новые возможности во многих отраслях науки и техники и гигантски ускорило темпы их развития. Успешно развиваются такие отрасли техники, как радиолокация, радионавигация, радиоастрономия, радиометеорология, радиоспектроскопия, радиоизмерительная техника, электронная вычислительная техника и т. д.

С достижениями радиоэлектроники непосредственно связано и создание искусственных спутников Земли, так как без радиоэлектронных приборов был бы невозможен запуск ракет-носителей, выведение их на орбиту и получение сигналов с необходимыми данными.

Непревзойденная эффективность радиоэлектронной аппаратуры достигается благодаря исключительно высокому быстродействию и огромным точности и чувствительности, недостижимым для других средств.

Внедрение радиоэлектроники в народное хозяйство открывает грандиозные перспективы полной автоматизации производственных процессов и ведет к новому промышленному перевороту, подлинное значение которого трудно еще полностью оценить.

В недалеком будущем при помощи электронных вычислительных машин будет осуществлено автоматическое управление целыми заводами, станет возможным автоматическое регулирование сложнейших технологических процессов.

Человек уже сейчас не может управлять многими объектами, движущимися с огромными скоростями, так как он физиологически не обладает необходимой для этого

быстротой реагирования. При помощи же электронных вычислительных машин он сможет по радио управлять даже ракетами в межпланетном пространстве.

Важнейшим элементом любого радиоэлектронного устройства является электронный вакуумный или полупроводниковый прибор. При помощи современных электронных вакуумных приборов осуществляется как дробление (до миллиардных долей ватта), так и высокая концентрация энергии (до десятков и сотен тысяч киловатт) в течение миллионных долей секунды. Исключительно высокое быстродействие электровакуумных приборов основано на огромных скоростях движения электронов и их взаимодействия с электромагнитными колебаниями.

Изготовление электровакуумных приборов требует высокого уровня технической культуры и связано с широким использованием современных знаний в области физики, химии, металлургии, обработки металлов и других материалов и т. п.

Развитие электронных вакуумных приборов продолжается с расширяющимся размахом.

Приемно-усилительные лампы многих типов и конструкций, начиная от сверхминиатюрных ламп, имеющих размеры рисового зерна, мощные генераторные лампы для радиопередатчиков, сверхмощные импульсные генераторные приборы, различные видоизменения приемных и передающих электронно-лучевых трубок, многочисленные разновидности газоразрядных приборов, электронные микроскопы, дающие увеличение в десятки тысяч раз и позволяющие увидеть ранее неуловимые вирусы, и сложные многотонные ускорительные установки для расщепления атомных ядер — вот далеко не полный перечень, характеризующий разнообразие современных электронных и ионных приборов и устройств, насчитывающих многие сотни типов.

Выпуск электронных вакуумных приборов в наиболее развитых промышленных странах достигает сотен миллионов штук в год. При этом в наибольших количествах (70—80% от общего выпуска) производятся приемно-усилительные лампы, совершенствование которых определило основные достижения в конструировании приемных и других массовых радиотехнических устройств.

Естественно, поэтому, что появление в 1948 г. первых полупроводниковых триодов — транзисторов, выполняющих функции приемно-усилительных ламп, вскоре привлекло всеобщее внимание.

С тех пор со страниц многих газет, журналов и книг не сходят высказывания о неизбежности близкой замены электронных вакуумных приборов полупроводниковыми При этом для доказательства часто производится сопоставление потенциально возможных, но еще недостигнутых параметров полупроводниковых приборов с давно устарелыми и превзойденными параметрами приемно-усилительных ламп. Новая перспективная электронная техника не нуждается в подобных «доказательствах».

Для того чтобы объективно оценить будущее электронных вакуумных и полупроводниковых приборов, необходимо прежде всего обратиться к истории их возникновения и совершенствования, оценить реально достигнутые результаты и выяснить новые тенденции развития и применения.

2. ПЕРВЫЕ БЕЗЛАМПОВЫЕ РАДИОСТАНЦИИ

Первоначальные успехи радиотехники вовсе не были связаны с применением электронных ламп.

Общеизвестно, что в течение 15 лет после изобретения радио А. С. Поповым радиостанции были только искровыми.

От таких радиостанций большие мощности получить было трудно, так как мощные искровые разряды сильно нагревали разрядник, а это затрудняло обеспечение надежной работы.

В начале первой мировой войны в Москве на Ходынском поле была построена мощная искровая радиостанция с вращающимся разрядником. Во время работы станции между зубьями разрядника проскакивали такие сильные искры, что работа была слышна на 2 *км* от радиостанции. Длительно работать такой передатчик не мог.

К концу первого десятилетия XX в. у искровых разрядников появились серьезные конкуренты: электрическая дуга и машина высокой частоты.

Еще в 1900 г. ирландец Дуддель получил незатухающие электромагнитные колебания при помощи обыкновенной дуговой лампы постоянного тока (распространенной в то время), в цепь которой он включил колебательный контур.

Однако лишь после 12 лет длительной работы Паульсеном были сконструированы приспособления, позволившие начать строительство дуговых радиостанций. С 1912 г. мощные радиостанции дальнего действия начали строиться с дуговыми генераторами, работавшими незатухающими

колебаниями. При этом достигались большие мощности порядка сотен киловатт. Дуговые генераторы лучше всего работали на длинных волнах, которые к тому же обеспечивали необходимые дальности передачи.

В то время радиостанции мирового значения работали на волнах длиной 20—30 *км*. Самая мощная дуговая радиостанция в 3 600 *квт* была построена в 1924 г. на острове Ява для связи с Голландией.

Машина высокой частоты была разработана впервые в 1891 г. сербским ученым Тесла. Но только через 17 лет в 1908 г. первые инженерные конструкции машинных генераторов, вырабатывавших ток с частотой 100 и 200 *кгц*, были построены Александерсеном. В России в 1911 г. В. П. Вологдин создал оригинальную конструкцию высокочастотного машинного генератора и в течение последующих 20 лет разработал серию машин мощностью от 6 до 600 *квт*.

В 1916 г. во Владивостоке была построена радиостанция с машиной Вологдина мощностью в 300 *квт*. Наиболее известны машины Вологдина мощностью в 50 и 150 *квг*, которые долго работали на Октябрьском радиоцентре в Москве.

Несмотря на успехи в конструировании и строительстве дуговых и машинных приборов, они были неперспективны из-за присущих им крупных недостатков: невозможности применения на коротких волнах, недостаточной стабильности частоты и практической пригодности главным образом для радиотелеграфной работы.

Успешное развитие сверхдальних радиотелеграфных связей при помощи дуговых и машинных радиостанций создавало лишь внешнее впечатление, что дальнейшее развитие радиосвязи пойдет по проторенной дороге. Уже в этот период в тиши лабораторий подрастал новый соперник, которому предстояло совершить переворот в радиотехнике и основать новую отрасль в науке об электричестве, названную электроникой.

3. ПОЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП. ПЕРВЫЕ УСПЕХИ СОВЕТСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Электронная усилительная лампа-триод была впервые предложена Ли де Форестом в 1907 г., пройдя 24-летний путь развития от опытов Эдисона, открывшего в 1883 г. явление прохождения тока через вакуум. Однако потребовался еще десяток лет поисков и разработок, чтобы

электронная лампа вышла на широкую дорогу, продолжая непрерывно улучшаться и видоизменяться Характерно, что только в 1913 г. (через 6 лет после изобретения электронной лампы) Мейснер в Германии установил, что при помощи электронной лампы можно простыми средствами получить незатухающие колебания, используя обратную связь между катушками индуктивности, включенными в цепи анода и сетки лампы.

Практически электронные лампы начали широко применяться только в 20-х годах нашего столетия.

На каких же приборах основывалась радиоприемная техника в первые десятилетия ее развития?

Еще в 1900 г. А. С. Попов заменил несовершенный когерер детектором из пары уголь — сталь, который явился, таким образом, предшественником кристаллического детектора. В последующие годы в различных странах велись интенсивные разработки и исследования новых типов детекторов. В ходе этих работ появились: в 1902 г. магнитные детекторы, в 1905 г. электролитический детектор и, наконец, в 1906 г. карборундовый кристаллический детектор, предложенный Ленвуди. В течение двух следующих лет кристаллический детектор получил широкое применение, так как он позволил упростить устройство радиоприемника и одновременно значительно повысил его чувствительность. Как известно детекторные приемники на кристаллических точечных детекторах выпускались нашей промышленностью вплоть до начала 30-х годов в больших количествах, что в немалой степени содействовало радиофикации деревни, особенно в районах, не обеспеченных электроэнергией. Таким образом, полупроводниковые приборы были предшественниками электронных ламп.

Первые радиолампы в России были изготовлены в 1914 г. Н. Д. Папалекси. Эти лампы были газонаполненными, а не вакуумными. Перед включением такой лампы специальный отросток на ее баллоне подогревался горящей спичкой и выделял пары ртути. В то время преимущества вакуумных ламп не без оснований считались далеко не бесспорными. В самом деле, ведь очень заманчиво получить большой анодный ток в лампе с сравнительно маломощным прямонакальным катодом.

Но полного решения найдено не было и даже в настоящее время — через 45 лет — создание усилительных и генераторных газонаполненных ламп, несмотря на некоторые успехи, остается еще делом будущего.

Первые русские вакуумные приемно-усилительные лампы были изготовлены М. А. Бонч-Бруевичем на Тверской приемной радиостанции в 1916 г.

В марте 1919 г. начался серийный выпуск приемно-усилительных триодов, типа ПР-1 (ПР—пустотное реле), разработанных М. А. Бонч-Бруевичем в Нижегородской радиолаборатории, организованной в конце 1918 г. по декрету Совета Народных Комиссаров. Впоследствии триод ПР-1 был назван «бабушкой русской радиолампы».

В истории советской радиотехники Нижегородская радиолаборатория сыграла крупнейшую роль. Несмотря на оторванность от других стран в связи с блокадой и отсутствие информации о работах в области радиотехники за границей, Нижегородская радиолаборатория выполнила большое количество интересных оригинальных работ, позволивших осуществить идею В. И. Ленина о создании газеты без бумаги и расстояния.

Когда после снятия с Советской страны блокады достижения нижегородцев стали известны за рубежом, оказалось, что по некоторым вопросам советские специалисты не только не отстали, но и опередили радиолаборатории передовых иностранных фирм. Основой этих успехов были работы М. А. Бонч-Бруевича в области конструирования и применения электронных ламп. Весной в 1920 г. им была закончена разработка первых в мире генераторных ламп мощностью до 1 *квт* с медным анодом, охлаждаемым водой, для первого радиотелефонного передатчика. В 1922 г. в результате модернизации мощность этой лампы была повышена до 3 *квт*, что позволило увеличить мощность первой радиотелефонной станции имени Коминтерна до невиданной в то время величины — 12 *квт*.

Конструкции генераторных вакуумных электронных ламп создавались и совершенствовались практически одновременно с приемно-усилительными лампами, обгоняя даже последние в своем развитии. Для увеличения мощности электронных ламп пришлось, естественно, увеличивать размеры катода, анода и сетки, повышать анодное напряжение, обеспечивать отвод тепла, выделяемого на аноде и сетке, и решать ряд связанных с этим конструктивных и технологических задач. Но принципиально электронная лампа уже тогда была пригодна для генерирования и усиления широкого диапазона мощностей. Так, например, весной 1923 г. в Нижегородской лаборатории были изготовлены образцы генераторных ламп мощностью 25 *квт*

с водяным охлаждением. В том же году был начат производственный выпуск приемно-усилительного триода Р5, который имел весьма неэкономичный прямонакальный вольфрамовый катод, потреблявший ток 0,7 *а* при напряжении 3,8 *в*. Крутизна характеристики Р5 достигала всего 0,32 *ма/в*.

Разработки новых мощных генераторных ламп опередили в то время уровень европейской электровакуумной техники, и в 1923 г. немцы заказали в Нижегородской лаборатории 25-киловаттные лампы для своей радиостанции в Науэне.

4. ГЕНЕРИРУЮЩИЙ КРИСТАЛЛ ЛОСЕВА. КРИСТАДИН

Возможность генерировать и усиливать радиосигналы при помощи полупроводниковых приборов была открыта не в 1948 г., когда появилась первая конструкция точечного транзистора, а еще в 1922 г. сотрудником Нижегородской радиолаборатории О. В. Лосевым.

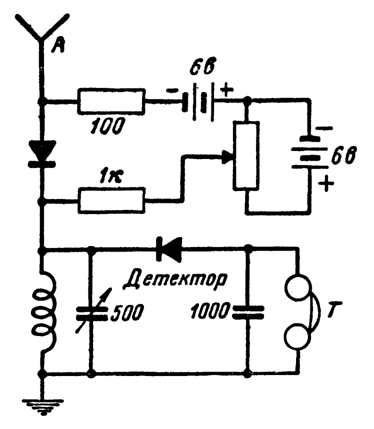


Рис. 1. Принципиальная схема „кристадина".

Исследуя различные видоизменения кристаллических детекторов. Лосев установил, что если на кристалл цинкита (окись цинка) подать небольшое напряжение от 6 до 8 *в*, то прикосновение к кристаллу стальной пружинки вызывает генерацию колебаний с частотой до 1—2 *Мгц*. Это явление было использовано О. В. Лосевым в созданном им безламповом приемнике, получившем название кристадина (рис. 1). Верхняя часть схемы является приставкой с генерирующим кристаллом, а нижняя часть ничем не отличается от схемы обычного детекторного приемника. Колебательная энергия, передаваемая приставкой во входной контур детекторнго приемника, компенсирует потери в нем, выполняя при этом как бы роль усилителя высокой частоты. Напряжение на генерирующий кристалл подается с потенциометра сопротивлением 500 *ом* через сопротивление 1 000 *ом*. При настройке приемника на гене-

рирующий кристалл включается сначала максимальное напряжение 12 *в* и при помощи стальной пружинки нащупывают на кристалле генерирующую точку. С появлением генерации в виде свиста и шорохов в телефоне напряжение на генерирующем кристалле уменьшают до момента исчезновения свиста при сохранении шорохов в телефоне. В этом режиме усиление кристадина будет наибольшим подобно тому, как в регенеративном приемнике наибольшее усиление обеспечивается при величине обратной связи, близкой к критической.

Потребляемый генерирующим кристаллом ток незначителен. Благодаря этому для работы кристадина оказывается достаточно нескольких небольших сухих гальванических элементов, которые очень мало расходуются.

Открытие Лосева вызвало огромный резонанс во всем мире. В США журнал «Radio News» поместил в сентябрьском номере редакционную статью под заголовком «Сенсационное радиоизобретение». В ней говорилось: «Нет надобности доказывать, что это — революционное радиоизобретение. В скором времени мы будем говорить о схеме с тремя или шестью кристаллами, как мы говорим теперь о схеме с тремя или шестью усилительными лампами.

Потребуется несколько лет для того, чтобы генерирующий кристалл усовершенствовался настолько, чтобы стать лучше вакуумной лампы, но мы предсказываем, что такое время наступит».

В этом предсказании не оправдались только сроки. Генерирующие полупроводниковые приборы 20-х годов были еще слишком несовершенными, чтобы конкурировать с электронной вакуумной лампой, конструкция которой уже тогда обеспечивала усиление и генерирование как малых, так и больших мощностей в диапазонах не только длинных и средних, но и коротких волн.

Необходимые знания в области физики твердого тела и теории полупроводников еще не были накоплены, а способы получения монокристаллов полупроводников, методы их очистки и введения в них примесей еще не были разработаны. Не были также известны способы определения ничтожно малых количеств примесей и т. п. Нужны были еще многие годы упорного труда коллективов исследователей для создания научной и технической базы полупроводниковой техники. Все это не умаляет, однако, значения открытия О. В. Лосева, которое подобно молнии осветило далекие перспективы электроники.

5. ГОСПОДСТВО ТРИОДНЫХ ЛАМП. УСЛОЖНЕНИЕ ТРИОДА

В 1918 г. одновременно в нескольких странах была запатентована схема супергетеродина, являющаяся и в настоящее время основой современных радиоприемников. Однако попытки ряда фирм организовать производство супергетеродинных приемников в то время успеха не имели. Применение в них триодов, остававшихся основным типом приемной лампы на протяжении 20-х годов, обеспечивает достижение высокой чувствительности приемника только при большом количестве каскадов, особенно в усилителе промежуточной частоты. Громоздкость такого приемника, свойственные ему серьезные помехи из-за сильных обратных связей между каскадами через проходную емкость лампы, многоручечное управление, требующее квалифицированного обращения, все это привело к тому, что в период с 1924 по 1929 г. супергетеродинные приемники успешно вытеснялись приемниками прямого усиления. В этот период вакуумный приемный триод был серьезно усовершенствован. Так, уже в 1924 г. вместо неэкономичного Р5 был выпущен триод Микро с торированной вольфрамовой нитью накала, которая при несколько меньшем напряжении потребляла вместо 700 *ма* только 60 *ма*.

В 1926 г. появилась нашумевшая тогда двухсеточная лампа Микро ДС. Функция управляющей сетки выполняла вторая сетка этой лампы, а первая сетка, названная катодной, окружала нить лампы и выполняла вспомогательную, но очень важную роль. На катодную сетку подавался небольшой положительный потенциал (несколько вольт), способствовавший образованию в непосредственной близости от управляющей сетки области значительного пространственного заряда (так называемого виртуального катода).

Благодаря этому лампа Микро ДС могла работать при пониженном анодном напряжении величиной от 6 до 20 *в* и стала незаменимой в радиолюбительской практике того времени. Правда, при этом она потребляла несколько больший ток от анодной батареи. В остальном Микро ДС по своим свойствам практически не отличалась от обычных триодов. Именно это и предопределило ее сравнительно недолгую жизнь. Лишь через 30 примерно лет лампы с катодной сеткой вновь появились на свет, но, как будет показано ниже, уже на новой технической основе.

В начале 30-х годов был начат выпуск приемных ламп с подогревным катодом, предложенным еще в 1918 г.

А. А. Чернышевым. Это позволило осуществить полное питание приемных устройств от сети переменного тока и быстро двинуть вперед технику радиоприема. В семью подогревных ламп сразу же вошли тетроды, называвшиеся тогда экранированными лампами. Применение подогревных тетродов с усилением на порядок выше, чем у триодов и специальных усилительных выходных триодов с толстыми нитями накала, обеспечило выпуск высокочувствительных приемников прямого усиления с относительно мощным выходом, нагруженным на громкоговоритель.

На стыке 20-х и 30-х годов количество типов приемно-усилительных ламп было еще очень невелико и даже в странах с наиболее развитой электровакуумной промышленностью насчитывалось единицами. Так, например, по данным апрельского номера журнала «Электроникс» за 1950 г в США в 1930 г. выпускалось только 11 типов приемно-усилительных ламп.

6. МНОГОСЕТОЧНЫЕ ЛАМПЫ. СПЕЦИАЛИЗАЦИЯ ПРИЕМНО-УСИЛИТЕЛЬНЫХ И ГЕНЕРАТОРНЫХ ЛАМП

Следующее десятилетие было периодом ускоренного развития радиоприемной техники.

В середине 30-х годов эпоха приемников прямого усиления закончилась. Введение в лампу защитной (антидинатронной) сетки позволило перейти к пентодам, различные видоизменения которых для усиления высоких промежуточных и низких частот остаются и в настоящее время самыми распространенными лампами в современных радиоприемных устройствах. Кончилась эпоха универсальных ламп и началась специализация отдельных типов ламп для различных элементов схем.

Для преобразования частоты были сконструированы специальные преобразовательные многосеточные лампы — гексоды, гептоды и октоды, имеющие по две управляющие сетки (к одной из них подводится напряжение сигнала, а на другую подается напряжение от гетеродина или же эта вторая сетка включается в схему гетеродина), а также комбинированные лампы—триод-гексоды и триод-гептоды. В последнем случае триод работает в схеме гетеродина, а гептод используется в качестве смесителя. Основным типом детектора стал ламповый диод, обеспечивающий линейное детектирование при сильных сигналах и позво-

ливший осуществить автоматическую регулировку усиления в приемниках.

В связи с этим появились комбинированные лампы с диодами, в том числе двойные диод-пентоды, двойные диод-триоды и двойные диоды. Один диод выполняет функции детектора, а другой работает в схеме автоматической регулировки усиления. Для работы в выходных каскадах приемников были разработаны низкочастотные пентоды и лучевые тетроды, обладающие пентодными характеристиками.

Дальнейшее развитие получили и триоды, специализация которых привела к созданию триодов с различными коэффициентами усиления для низких и высоких частот, выходных триодов, регулировочных триодов для работы в схемах стабилизации напряжения, импульсных триодов для работы в схемах мультивибраторов и т. д.

Большое развитие получили выпрямительные вакуумные лампы — кенотроны, ставшие составной частью комплекта ламп в радиоприемном устройстве.

Все это обеспечило необходимую техническую базу для возрождения супергетеродинного приемника, ставшего наиболее надежным устройством для дальнего приема во всех диапазонах волн.

Широкое применение приемно-усилительных ламп в массовой аппаратуре и резкое увеличение объема их производства вызвало необходимость более тщательной отработки конструкции их электродов, внешнего оформления и унификации цоколевки.

Появляются специальные серии ламп, приспособленные к различным условиям питания, в том числе прямонакальные, рассчитанные на напряжения накала 1,25; 1,4; 2,4; 2,8 *в* и подогревные — на напряжения накала 4; 5; 6,3 и 12,6 *в*.

Стремление повысить надежность ламп вызвало появление металлических ламп, нашедших широкое применение в радиоприемной аппаратуре во второй половине 30-х годов. Практика, однако, показала, что металлические лампы не оправдали возлагавшихся на них надежд, так как их изготовление было все же сложнее изготовления стеклянных ламп, которые в ходе дальнейшего совершенствования оказались не хуже металлических не только по электрическим параметрам, но и по механической прочности.

К концу 30-х годов были разработаны и применялись все основные функциональные разновидности приемно-усилительных ламп. Наиболее серьезный стимул к дальнейшему их совершенствованию и специализации был создан в это время в связи с началом освоения черно-белого телевидения и вызванным этим переходом к освоению диапазона метровых волн.

Именно к этому периоду относится начало выпуска телевизионных широкополосных пентодов с повышенной крутизной характеристики (до 9 *ма/в*).

Еще в конце 20-х годов в связи с освоением диапазона коротких волн в СССР была разработана серия генераторных тетродов мощностью до 3 *квт*, а в предвоенные годы — серия генераторных пентодов средней мощности (до 750 *вт*), отдельные типы которых выпускаются и в настоящее время. Для оконечных каскадов передающих радиостанций в 30-х годах выпускалась серия генераторных триодов с водяным охлаждением мощностью до 100 *квт*.

Таким образом, вакуумная электронная лампа оказалась гибким устройством, принципы работы которого позволили создать очень много приборов, способных удовлетворять разнообразнейшие требования — от усиления и преобразования электрических колебаний ничтожной мощности до генерирования сотен киловатт электрической энергии высокой частоты.

7. ПЕРЕХОД НА СВЕРХВЫСОКИЕ ЧАСТОТЫ. МАГНЕТРОН И КЛИСТРОН. ВОЗРОЖДЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА

С начала 40-х годов, в период второй мировой войны, началось быстрое развитие радиолокационной техники и связанное с ней освоение диапазонов дециметровых и сантиметровых волн. Это стало возможным только в результате создания специальных вакуумных электронных ламп для усиления и генерирования колебаний в новых диапазонах волн.

Уже при переходе на частоты, соответствующие дециметровым волнам (выше 60 *Мгц*), межэлектродные емкости ламп обычной конструкции и индуктивности их выводов становились сравнимыми с емкостью и индуктивностью колебательного контура При сравнительно больших значениях межэлектродных емкостей и индуктивностей выводов довольно быстро наступает предел, выше которого дальнейшее уменьшение L и C контура практически не

обеспечивает повышения генерируемой частоты. С возрастанием частоты омические сопротивления выводов ламп увеличиваются, так как чем больше частота тока, тем тоньше поверхностный слой проводника, по которому он протекает. В результате резко возрастают тепловые потери высокочастотной энергии на выводах ламп. Потери увеличиваются также в связи с излучением энергии на выводах.

Эти затруднения были преодолены благодаря изменению конструкций как генераторных, гак и приемно-усилительных ламп. Так, для уменьшения межэлектродных емкостей и индуктивностей выводов и снижения высокочастотных потерь в генераторных лампах стали применяться аноды уменьшенных размеров, но с ребристой поверхностью, что обеспечило необходимое рассеивание тепла. Так называемую «гребешковую» ножку лампы заменила плоская ножка, позволившая резко укоротить длину выводов. В некоторых генераторных лампах были сделаны двойные боковые выводы анода и сетки.

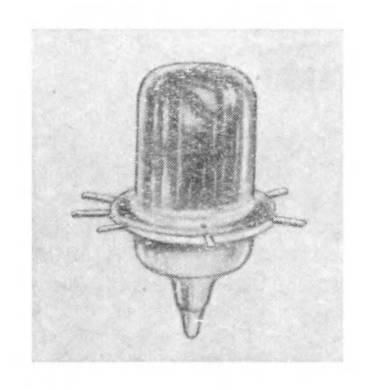


Рис. 2. Лампа типа „жолудь".

Известным шагом вперед было создание миниатюрных стеклянных приемно-усилительных ламп типа «Жолудь», названных так из-за своей характерной формы. Выводы таких ламп сделаны очень короткими, так как они проходят не через одну ножку, как у обычных ламп, а в разные стороны по образующей колбы (рис. 2). Однако широкого применения лампы серии «жолудь» не нашли как из-за сложности их изготовления, так из-за ряда свойственных им недостатков.

Однако для перехода от относительно коротких дециметровых волн к еще более коротким сантиметровым такие конструктивные изменения были недостаточны. На этих частотах лампа теряла работоспособность, явно не оправдывая приписывавшихся ей ранее свойств безинерционности. В лампах обычных конструкций время пролета электронов равно примерно 10^{-9} *сек*, что соответ-

ствует длительности одного периода колебаний при частоте 1 000 *Мгц*.

Стало ясно, что для генерирования колебаний на сверхвысоких частотах в конструкции ламп должна учитываться инерция электронов. Позднейшие работы показали, что предельная длина волны триода определяется углом пролета электронов между катодом и сеткой, причем предельный угол пролета равен 120°.

Это обстоятельство привело к созданию новых типов ламп, где время пролета электронов уменьшено благодаря укорочению расстояний между электродами и некоторому повышению напряжения на аноде, ускоряющему движение электронов.

Первые триоды с предельной волной 15—20 *см* типов ДЦ-21 и ДЦМ1 были созданы в Ленинграде в 1938—1939 гг. под руководством Н. Д. Девяткова. В них были впервые применены плоские электроды вместо цилиндрических, что позволило сократить расстояние между электродами. Конструкция выводов была рассчитана на применение внешних коаксиальных резонаторов. Таким образом, эти лампы были предшественницами маячковых и металлокерамических триодов с дисковыми впаями, ряд типов которых был разработан в период второй мировой войны (рис. 3).

В конце 30-х годов были разработаны также первые конструкции принципиально новых электронных вакуумных приборов — многорезонаторного магнетрона и отражательного клистрона, основанных на использовании конечного времени пролета электронов в лампе. Характерной особенностью многорезонаторного магнетрона является применение цилиндрического анода, изготовленного из монолитной медной болванки. Со стороны внутренней поверхности анода прорезаны продольные щели, переходящие в цилиндрические отверстия, которые являются объемными резонаторами. По постоянному току многорезонаторный магнетрон имеет только один анод. Поэтому все объемные резонаторы находятся под одинаковым постоянным напряжением по отношению к катоду. При работе многорезонаторного магнетрона под воздействием сильного магнитного поля, направленного вдоль его оси, возникает облако электронов, вращающееся вокруг оксидного подогревного катода. При этом электроны, летящие с одинаковой скоростью, группируются под влиянием тормозящего поля у щелей между резонаторами в пакеты, напоминающие

спицы (рис. 4). Объемные резонаторы обычно настраиваются так, чтобы сдвиг фаз между ними был равен 180°. Благодаря этому при возбуждении резонаторов по аноду бежит волна электромагнитного поля, частота которого определяется параметрами резонаторов. Электронные пакеты перемещаются вместе с этим полем, отдавая ему свою энергию. Многорезонаторный магнетрон представляет

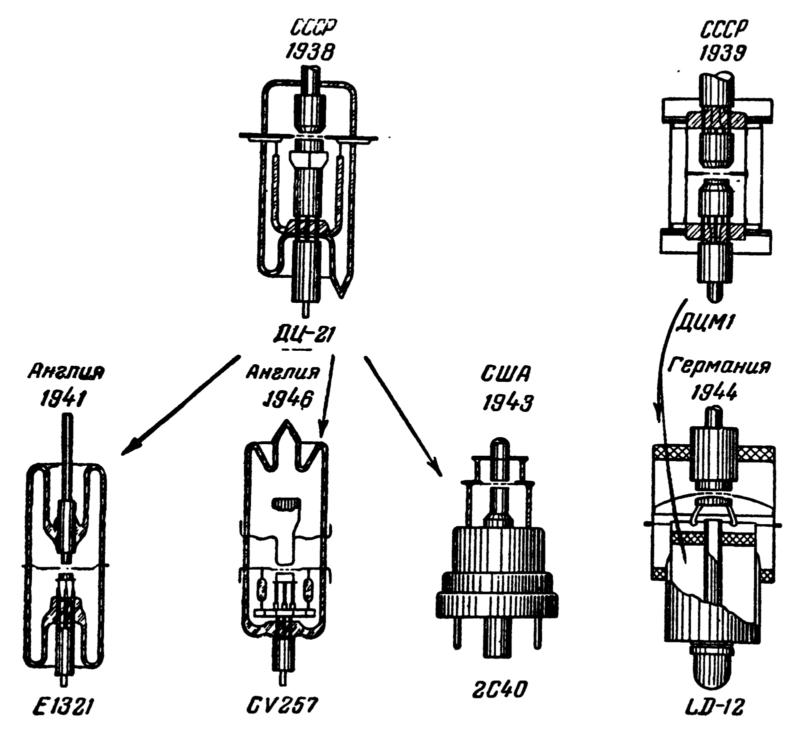


Рис. 3. Развитие конструкции триода сантиметрового диапазона.

собой, по существу, законченный генератор электромагнитной энергии, принципиально отличаясь этим от всех ранее созданных электронных ламп. Вывод энергии осуществляется обычно через концентрическую линию или волновод при помощи петли, помещенной в одном из резонаторов. Многорезонаторному магнетрону предшествовало много различных видов магнетронов, не нашедших широко применения. Вплоть до последнего времени этот прибор оставался основным типом мощной генераторной лампы

для генерирования электромагнитной энергии в диапазонах сантиметровых и миллиметровых волн с высоким к. п. д., достигающим 50%. Приоритет в создании многорезонаторного магнетрона принадлежит советскому инженеру В. П. Илясову, который в 1939 г. запатентовал его

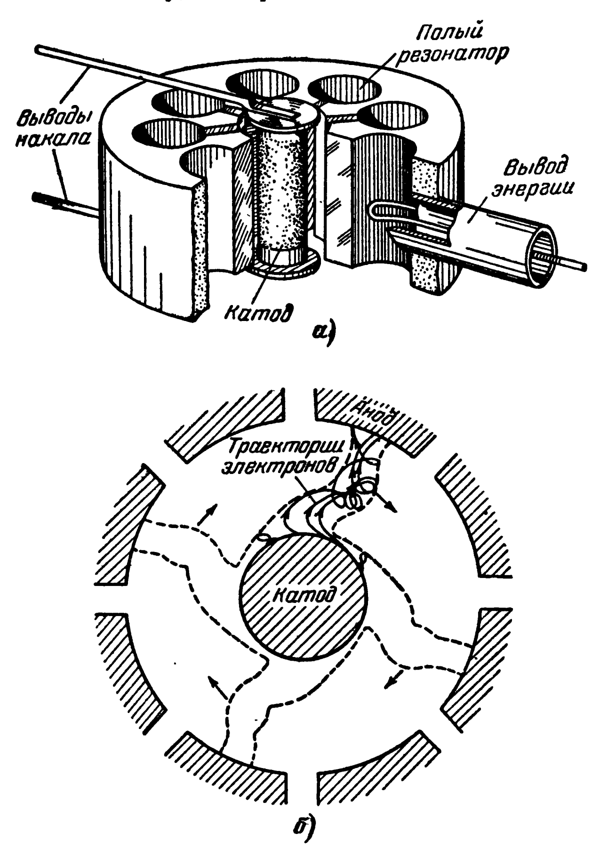


Рис. 4. Магнетрон.

а — схематическое изображение устройства многорезонаторного магнетрона; б — спицеобразная форма электронного облака в магнетроне.

основные конструктивные элементы, в том числе 12-резонаторный анодный блок и полый цилиндрический катод. Описание многорезонаторного магнетрона было впервые опубликовано в периодической печати в 1940 г. Н. Ф. Алексеевым и Д. Е. Маляровым в статье «Получение мощных колебаний магнетроном в сантиметровом диапазоне волн».

Импульсные магнетроны, генерирующие мощные, но очень кратковременные импульсы сверхвысокой частоты, обеспечили создание радиолокационной аппаратуры. По данным периодической литературы в первые годы после второй мировой войны при помощи импульсных многорезонаторных магнетронов на волне 1 *см* была достигнута импульс-

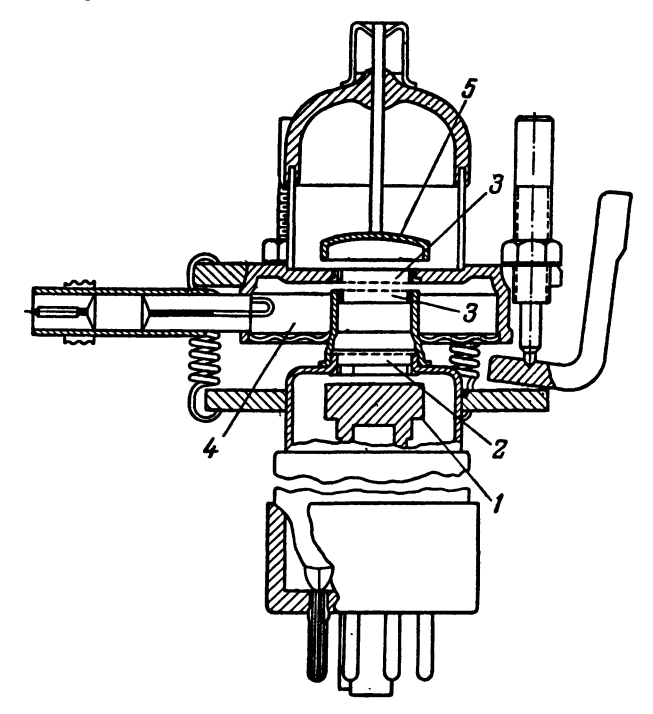


Рис. 5. Устройство одного из отражательных клистронов.
1 — электронный прожектор; *2* — ускоряющая сетка; *3* — сетки резонатора; *4* — объемный резонатор; *5* — отражатель.

ная мощность 100 *квт*, а на волне 10 *см* — порядка 3 000 *квт*, при рабочих напряжениях примерно до 40 *кв*.

Одновременно с магнетронными генераторами создавались радиоприемные устройства в тех же диапазонах волн. Одним из основных элементов такого приемника — гетеродином — стал отражательный клистрон (рис. 5). В отражательном клистроне, кроме электронного прожектора и ускоряющей сетки, имеется два основных элемента: объемный тороидальный резонатор с отверстиями (сетками) в центральной части и отражатель. Эмиттируемые катодом

электроны под воздействием положительного потенциала на резонаторе пролетают сквозь него и, затормаживаясь отрицательным полем отражателя, возвращаются в полость резонатора, описывая дугообразные траектории. Обладая различными скоростями, приобретенными при пролете через резонатор, электроны сгруппировываются в сгустки, достигающие наибольшей плотности к моменту их возвращения в резонатор. Если поле ускоряет пролетающие сквозь резонатор электроны, то возвращающиеся в тот же момент электроны оно тормозит, что является необходимым условием для превращения энергии электронов в электромагнитную высокочастотную энергию в объемном резонаторе. Поэтому параметры отражательного клистрона рассчитываются так, чтобы, по возможности, бо́льшая часть сгустков электронов возвращалась в резонатор в момент, когда его поле будет для них тормозящим. Коэффициент полезного действия отражательных клистронов невелик и не превышает 3%. Существенного значения это не имеет из-за незначительной мощности отражательных клистронов, не превышающей единиц ватт.

Таким образом, генерирование сверхвысокочастотных колебаний стало возможным благодаря использованию принципа группирования электронов, реализованного различными методами в магнетроне и клистроне.

Попытки применить в приемниках сантиметрового диапазона волн электронные лампы для преобразования частоты оказались малоуспешными из-за сравнительно высокого уровня шума, свойственного этим лампам на сверхвысоких частотах.

Огромная чувствительность, требовавшаяся от радиолокационных приемников, уже в дециметровом диапазоне волн ограничивалась внутренними шумами, главным образом из-за хаотических колебаний электронов, образующих электронный поток в первой лампе, и теплового движения электронов в ее сеточной цепи. В сантиметровом же диапазоне волн даже ламповые диоды оказались неэффективными из-за влияния инерции электронов. Поэтому крайне важно было найти малошумящий электронный прибор, пригодный для выполнения функций смесителя. Таким прибором оказался кремниевый детектор, обладающий ничтожной емкостью и незначительным уровнем шумов (рис 6).

Конструкция смесительного свч детектора резко отличается от конструкций кристаллических детекторов 20-х годов. Он смонтирован в керамическом миниатюрном пат-

роне и легко сменяется подобно электронной лампе. Детектирующий контакт закреплен постоянно и защищен от влаги специальной восковидной массой. В ходе разработки кремниевого смесительного детектора были достигнуты серьезные успехи в получении особо чистого кремния, содержание которого в кристалле было доведено до 99,9%. Кремниевые детекторы оказались достаточно прочными, надежными приборами и широко применяются и в настоящее время. Однако свойственная им высокая чувствительность к воздействиям сравнительно слабых внешних полей приводит в ряде случаев к порче детекторов.

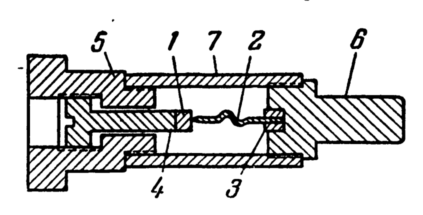


Рис. 6. Устройство кремниевого сверхвысокочастотного детектора.

1 — кристалл кремния; 2 — вольфрамовая проволочка; 3 — точка укрепления проволочки; 4 — регулировочный болт; 5 и 6 — латунные наконечники; 7 — керамическая оболочка.

Возрождение кристаллического детектора имело огромное значение для развития полупроводниковой техники, так как стимулировало развертывание широкого круга исследований в области физики твердого тела. Прошло немного лет и это дало серьезные результаты.

8. МИНИАТЮРИЗАЦИЯ ПРИЕМНО-УСИЛИТЕЛЬНЫХ ЛАМП

В период второй мировой войны электронные приборы широко применялись в различных видах вооружения. Одним из наиболее интересных оказалось их использование в неконтактных взрывателях зенитных снарядов, что значительно повысило точность стрельбы по самолетам. Для этой цели были разработаны сверхминиатюрные лампы специальной особопрочной конструкции. Оказалось, что резкое уменьшение размеров лампы серьезно облегчило решение поставленной задачи. Самый хрупкий элемент радиоэлектронного устройства — стеклянная радиолампа, диаметр баллона которой не превышал 10 *мм,* оказалась способной выдерживать артиллерийский выстрел (т. е. линейные ускорения порядка нескольких тысяч g) и сохранять после него работоспособность. Уже тогда было ясно, что сравнительно большие размеры многих типов приемно-усилительных ламп, работавших в каскадах усиления высокой и промежуточной частоты, а также в качестве преобразователей частоты, вовсе не оправданы. Лишь у вы-

ходных ламп увеличенные размеры электродов и баллона определялись необходимостью рассеять мощность порядка нескольких ватт и более. Непрерывное возрастание количества ламп в различных установках приводило к увеличению габаритов последних. Поэтому вполне закономерным и назревшим было создание миниатюрных, так называемых пальчиковых ламп. В сущности, это была первая конструкция ламп, ставшая подлинно международной. В настоящее время большинство современных типов приемно-усилительных ламп выпускается в миниатюрном конструктивном оформлении двух видов: в баллоне диаметром 19 *мм* с семью штырьками и в баллоне диаметром 22,5 *мм* с девятью штырьками. Весьма удобным оказались сверхминиатюрные прямонакальные лампы, разработанные для портативных аппаратов для тугоухих. В сверхминиатюрном конструктивном оформлении был изготовлен в дальнейшем также ряд типов подогревных ламп, аналогичных по параметрам наиболее распространенным миниатюрным (пальчиковым) лампам.



Рис. 7. Уменьшение размеров приемно-усилительных ламп.

Для характеристики уменьшения габаритов приемно-усилительных ламп достаточно указать, что если некоторые старые типы ламп занимали объем 85 *см*³, то объем миниатюрных (пальчиковых) ламп составляет от 8 до 18 *см*³, а сверхминиатюрных—только от 1,5 до 2 *см*³.

В ряде стран развернулись работы по повышению долговечности и общей надежности приемно-усилительных ламп. В частности, серьезному усовершенствованию подверглась наиболее уязвимая часть электронной вакуумной лампы — катод. В результате этих работ появились лампы

со сроком службы порядка 10 тыс. *ч*, а также лампы повышенной механической прочности, выдерживающие различные виды тряски и вибраций. Было установлено, что наибольшее количество выходов ламп из строя приходится на так называемые «детские болезни», т. е. на повреждения, связанные с первыми часами их работы. В связи с этим для ламп повышенной надежности были введены специальные предварительные тренировки. Таким образом, во второй половине 40-х годов области применения вакуумных электронных ламп продолжали расширяться нарастающими темпами, что было тесно связано с общими успехами радиоэлектроники.

9. НАЧАЛО НОВОЙ ЭРЫ В РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ—ТОЧЕЧНЫЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ ДИОДЫ, ТОЧЕЧНЫЙ ТРАНЗИСТОР

В тот же период обозначились новые крупные успехи в исследовании полупроводников, положившие начало самостоятельному направлению в развитии электроники — полупроводниковой электронике.

Серьезная теоретическая и экспериментальная работа, проводившаяся в течение длительного времени многими советскими и иностранными учеными, позволила установить основные физические закономерности выпрямления при помощи полупроводников. Первоначально это были выпрямительные элементы на основе селена, окиси меди и сульфидов. Применение кремниевых сверхвысокочастотных детекторов вновь привлекло внимание к кристаллическим детекторам. Выпрямляющее действие точечного контакта с германием было уже также известно. Поэтому достигнутые в начале 40-х годов успехи в получении монокристаллического германия и разработке методов его очистки от примесей довольно быстро привели к созданию германиевых выпрямительных диодов.

Германий — твердый элемент серебристо-белого металлического цвета, находящийся в IV группе периодической системы Менделеева (т. е. имеющий в оболочке 4 валентных электрона). Его главные физические и химические свойства были предсказаны Менделеевым в 1871 г. и полностью подтвердились в 1886 г., когда германий был открыт.

Электрические свойства германия легко изменяются при введении в него ничтожных количеств примесей. Так, например, при введении всего одного атома примеси на 10^8—

10^9 атомов германия его электропроводность увеличивается. Примеси легко изменяют также характер проводимости германия. Для получения германия с дырочной проводимостью в него нужно ввести примеси индия или бора, алюминия, галлия, таллия, входящих в III группу периодической системы Менделеева, т. е. имеющих по три валентных электрона. Примеси же элементов, имеющих по пять валентных электронов, т. е. относящиеся к V группе периодической системы (сурьмы, висмута, фосфора и др.), сообщают германию электронную проводимость.

Как известно, основным элементом полупроводниковых диодов всех типов является так называемый электронно-дырочный переход, представляющий стык двух полупроводников с двумя типами проводимостей — электронной (n) и дырочной (p) *. На границе раздела этих полупроводников возникает тонкий слой (порядка 10^{-5} *см*), обедненный носителями зарядов и захватывающий часть дырочного и часть электронного полупроводников.

Благодаря свойственному этому слою высокому сопротивлению, во много раз превышающему суммарное сопротивление дырочного и электронного полупроводников, он выполняет роль запирающего слоя.

Под воздействием внешнего переменного электрического поля, направленного от дырочного полупроводника к электронному, ширина запирающего слоя уменьшается и его сопротивление резко снижается. В этот момент направление тока через полупроводник называется прямым или пропускным.

Когда же полярность приложенного напряжения изменится так, что внешнее электрическое поле будет направлено от слоя полупроводника с электронной проводимостью к слою с дырочной проводимостью, то ширина запирающего слоя увеличится, а его сопротивление резко возрастет, препятствуя прохождению тока. Такое направление тока через диод называется обратным или непропускным. Пульсация запирающего слоя электронно-дырочного перехода под воздействием приложенного к нему электрического переменного поля обеспечивает одностороннюю проводимость полупроводникового диода.

Запирающий слой обладает свойствами конденсатора, причем его емкость уменьшается при увеличении ширины запирающего слоя и увеличивается с уменьшением ширины

---

* n от слова „negative“ — „отрицательный“, p — „positive“ — „положительный“.

запирающего слоя. Это дало основание впоследствии предложить использовать электронно-дырочный переход в качестве переменного конденсатора, управляемого напряжением.

В точечных германиевых диодах электронно-дырочный переход создается между пластинкой германия с электронной проводимостью и острием контактной металлической пружинки (рис. 8). В результате специальной химической обработки на поверхности пластинки полупроводника создается тонкая пленка германия с дырочным механизмом проводимости.

Уже первые типы точечных выпрямительных диодов обладали рядом существенных достоинств, к важнейшим из которых относятся: отсутствие накала и, как следствие этого, мгновенная готовность к действию, а также способность работать в диапазоне частот до 100—150 *Мгц* при обратных напряжениях до сотни вольт.

Поэтому точечные выпрямительные диоды оказались удобными для работы в схемах амплитудных и частотных детекторов в радиоприемной, телевизионной и измерительной аппаратуре.

Дальнейшие исследования точечных выпрямительных диодов привели к открытию возможности усиления сигналов переменного тока за счет использования взаимодействия двух близко расположенных на кристалле контактов.

В 1948 г. Браттейном и Бардиным был предложен первый точечный полупроводниковый прибор, названный транзистором (рис. 9). Он состоял из пластинки монокристаллического германия с электронной проводимостью, припаянной противоположной стороной к массивному металлическому основанию, и двух заостренных металлических контактных проволочек. Обе контактные проволочки прикасаются своими остриями к одной тщательно обработанной поверхности германиевой пластинки. Одна из контактных проволочек находится под небольшим положительным потенциалом и называется эмиттером, так как она эмиттирует (вводит) дырки в германий типа *n*. На вторую проволочку — коллектор — подается отрицательный потенциал (если используется германий типа *p*, то полярность напряжения обратная).

Часть дырок, вводимых в германий эмиттером, перемещается в сторону коллектора под влиянием электрического поля между эмиттером и коллектором. Именно это обстоятельство и объясняет способность точечных тран-

зисторов работать при частотах порядка десятка мегагерц. Известную роль играет также процесс диффузии дырок в германии. Расстояние между точечными контактами эмиттера и коллектора подбирается таким, чтобы большая часть эмиттированных дырок дошла до коллектора (обычно оно равно около 50 *мк*). При этом ток коллектора лавинообразно возрастает. Таким образом, ток, проходящий в цепи эмиттера, управляет током в цепи коллектора.

Металлическое основание (база) триода выполняет роль управляющего электрода, так как от его потенциала относительно эмиттера зависит количество эмиттируемых дырок. Одновременно с усилением тока, которое в точеч-

Рис. 8. Устройство точечного германиевого выпрямительного диода.

1 — пластинка германия; *2* — игла; *3* — контактные выводы.

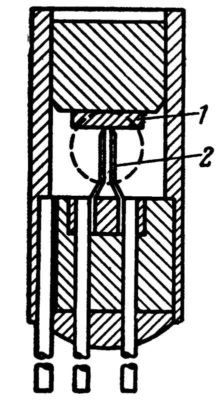


Рис. 9. Устройство точечного германиевого транзистора.

1 — пластинка германия; *2* — контактные пружинки.

ных транзисторах больше единицы (обычно 2—2,5 в статическом режиме), получается и усиление по напряжению, так как точечные транзисторы обладают малым входным и большим выходным сопротивлением[1]. Это объясняется тем, что эмиттер включен в схему в пропускном направлении, а коллектор — в запирающем.

Наибольшее применение точечные транзисторы получили в электронных вычислительных машинах благодаря неплохим импульсным свойствам. Чувствительность к перегрузкам и высокий уровень собственных шумов ограничили их применение в остальной радиотехнической аппаратуре.

Однако появление точечных транзисторов стимулировало развертывание широкого фронта поисковых работ в области полупроводниковых приборов и физики твердого тела и открыло новую эру в развитии электроники.

---

[1] Название „транзистор“ подчеркивает эту особенность — оно образовано путем сокращения слов „transformer of resistance“ (трансформатор сопротивления).

10. ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ. ГЕРМАНИЕВЫЕ ПЛОСКОСТНЫЕ ДИОДЫ И ТРАНЗИСТОРЫ

В 1950 г. были разработаны первые образцы выпрямительных германиевых диодов с так называемыми плоскостными или поверхностными контактами. Выпрямляющий электронно-дырочный переход в таком диоде получается обычно путем расплавления на одной из поверхностей пластинки монокристаллического германия *n*-типа небольшого кусочка индия. Часть индия при этом диффундирует внутрь германиевой пластинки и растворяет германий на небольшую глубину, образуя поверхностную область с проводимостью *p*-типа (рис. 10).

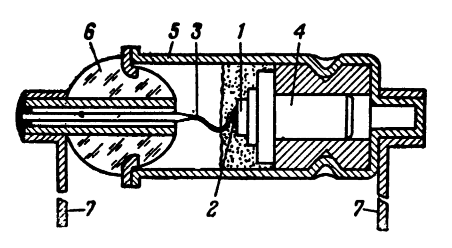


Рис. 10. Устройство плоскостного германиевого выпрямительного диода.

1 — пластинка германия; *2* — индий; *3* и *4* — токосниматели; *5* — корпус; *6* — стеклянный изолятор; *7* — контактные выводы.

Плоскостные германиевые диоды различных типов довольно быстро нашли применение в выпрямителях переменного тока. Малое сопротивление диодов в прямом (пропускном) направлении позволяет достигать номинальных значений выпрямленных токов уже при небольших напряжениях, не превышающих +1 *в*. Они оказались также пригодными для последовательного и параллельного соединения Однако при повышении температуры окружающей среды свыше 40—50° С, свойства плоскостных германиевых диодов быстро ухудшаются, что выражается в резком возрастании их обратной проводимости.

Несмотря на это, плоскостные германиевые диоды благодаря своему высокому к. п. д., уже на первых этапах развития оказались серьезными конкурентами вакуумных выпрямительных диодов (кенотронов).

В 1951 г., в результате дальнейшего исследования поверхностных контактов были разработаны первые плоскостные германиевые транзисторы с переходами проводимостей типа *p-n-p* и *n-p-n*.

Для получения плоскостного германиевого транзистора типа *p-n-p* необходимо на пластинке германия типа *n* создать не одну, а две поверхностные области с прово-

димостью p-типа. Это осуществляется описанным выше способом, т. е. небольшие кусочки индия расплавляются с двух сторон германиевой пластинки (рис. 11). Получается тройной слой, где тонкий промежуточный слой германия n-типа выполняет роль основания (базы), а поверхностные области с проводимостью p-типа — функции эмиттера и коллектора. К каждой из этих областей должны присоединяться выводы при помощи надежных контактов.

Несмотря на кажущуюся простоту, изготовление плоскостного транзистора возможно лишь при тщательном соблюдении оптимальных соотношений размеров эмиттера

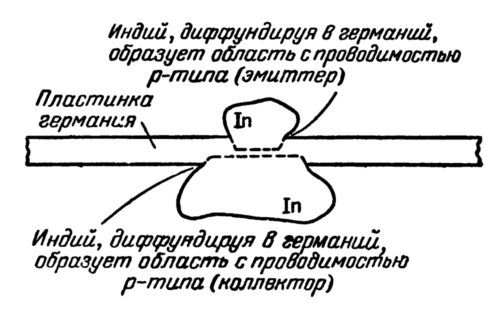


Рис. 11. Принципиальная схема изготовления плоскостных германиевых транзисторов p-n-p-типа.

и коллектора (коллектор должен быть примерно в 2 раза больше) и строгой их соосности и параллельности. При несоблюдении первого условия транзистор не будет обладать заданной мощностью, а нарушение второго условия вызовет резкое ухудшение его частотных характеристик. Плоскостной транзистор описанной конструкции часто называется сплавным (рис. 12). Плоскостные транзисторы n-p-n-типа могут быть изготовлены аналогичным способом, но в этом случае германиевая пластинка должна быть p-типа, а в качестве примесного материала для образования поверхностных областей n-типа используется сурьма.

Как и в точечном транзисторе, эмиттер плоскостного транзистора p-n-p-типа находится под небольшим положительным потенциалом (пропускное направление), а коллектор под отрицательным потенциалом (непропускное или обратное направление). Под действием этих потенциалов количество дырок в области базы, прилегающей к эмиттеру, увеличивается, а в области, при-

легающей к коллектору, уменьшается. Разность концентраций дырок на границах промежуточного слоя (базы) вызывает их диффузионное перемещение через базовую область от эмиттера к коллектору, в процессе которого они частично рекомбинируют в пути с электронами. Так как не все дырки достигают коллектора, то коэффициент усиления плоскостного транзистора по току меньше единицы (обычно от 0,95 до 0,99). Тем не менее плоскостной транзистор позволяет получить значительно большее усиление напряжения (а следовательно, и мощности), чем точечный транзистор, так как сопротивление цепи его коллектора в несколько раз превосходит сопротивление цепи коллектора точечного транзистора. Величина коэффициента усиления по току плоскостного транзистора и его частотные свойства непосредственно зависят от толщины базовой области. Если она недостаточно тонка, то соответственно большая часть дырок не дойдет до коллектора, что приведет к резкому уменьшению коэффициента усиления по току. Уменьшится также предельная частота усиления из-за увеличения времени перемещения носителей зарядов. Обычно толщина базовой области не превосходит 0,1 *мм*, а у высокочастотных транзисторов достигает единиц микрон. Установлено, что предельная частота усиления уменьшается прямо пропорционально квадрату увеличения толщины базы.

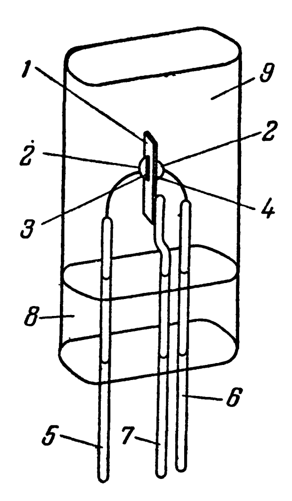


Рис. 12. Устройство сплавного германиевого транзистора *p-n-p*-типа.
1 — монокристалл германия *n*-типа; 2 — индий; 3 — коллекторный переход; 4—эмиттерный переход; 5 — коллектор; 6 — эмиттер; 7 — база; 8 — изолятор из стекла; 9 — оболочка.

При этом следует иметь в виду, что предельной частоте усиления соответствует уменьшение коэффициента усиления по току до 0,7 первоначального значения.

Существенное влияние на частотные свойства транзистора оказывает емкость коллекторного электронно-дырочного перехода и объемное сопротивление базы. Физически они образуют цепочку *RC*, через которую везникает обратная связь.

Близкие по своим свойствам к транзисторам типа *p-n-p* и отличаясь от них главным образом обратной полярностью электродов, транзисторы типа *n-p-n* благодаря этой особенности, оказались удобными для совместного применения с транзисторами типа *p-n-p* в бестрансформаторных двухтактных схемах.

Первые плоскостные транзисторы были пригодными в основном для усиления малых сигналов и имели предельные частоты усиления не выше 1 *Мгц*. Для использования транзисторов в радиоэлектронных устройствах ранее разработанные схемы на электронных лампах оказались непригодными. Да это и не удивительно, так как транзистор — электронный прибор, управляемый током, в то время как электронная лампа управляется напряжением. Кроме того, электрические параметры различных экземпляров транзисторов по сравнению с электронными лампами отличаются значительно большими разбросами. При повышении окружающей температуры свойства транзисторов сильно меняются. Наконец, собственные шумы транзисторов в несколько раз превосходят собственные шумы ламп, достигая 35 *дб*. Казалось бы, все это должно было сильно охладить стремление применить транзисторы вместо электронных ламп. Однако небольшие величины питающих напряжений и токов (напряжение коллектора маломощного транзистора порядка — 1 *в* и ток коллектора около 0,5 *ма*), отсутствие накаливаемого катода и, как следствие этого, повышенный к. п. д. и мгновенная готовность к действию свидетельствовали о бесспорной перспективности полупроводниковых приборов. За новые электронные приборы стоило бороться.

Поэтому исследования различных полупроводниковых материалов и разработка новых типов выпрямительных диодов и транзисторов продолжались с неослабевающей силой.

11. МОЩНЫЕ ГЕРМАНИЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Благодаря высокой эффективности транзисторов их применение должно быть особенно выгодным в выходных каскадах радиотехнических устройств, где экономия потребления энергии для питания электронных приборов имеет наибольшее значение.

Однако изготовление мощных транзисторов оказалось не простым делом. Для повышения мощности транзистора необходимо увеличить ток через электронно-дырочные переходы, а это вызывает повышение их температуры, что, как известно, приводит к ухудшению параметров транзи-

стора. Кроме того, простое увеличение поверхности эмиттерного перехода не обеспечивает необходимого улучшения его эффективности и может уменьшить коэффициент усиления по току. Потребовалась длительная работа по улучшению свойств германия и примесных материалов, а также по выбору оптимальных конфигураций основных конструктивных элементов транзистора, чтобы уменьшить потери.

Конструкция мощных транзисторов должна предусматривать возможность эффективного отвода тепла. Для этого коллекторный переход, как правило, напаивается на медное основание, непосредственно прилегающее к основанию металлической оболочки транзистора. Металлический баллон такого транзистора приспособлен обычно для привертывания непосредственно к шасси аппарата, которое выполняет роль радиатора (рис. 13).

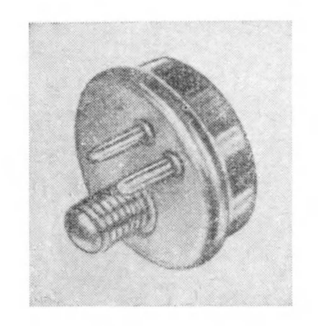


Рис. 13. Внешний вид мощного транзистора.

В случае хорошего отвода тепла, излучаемого коллекторным переходом, последний может отдавать полезную мощность в 1 *вт* с площади, равной всего 1 *мм*^{2}.

В конце 1954 г. началось изготовление транзисторов мощностью до 5 *вт*. В дальнейшем были разработаны транзисторы и большей мощности. Одним из типов мощных отечественных транзисторов является выпускаемый с 1956 г. транзистор типа П4, допускающий рассеивание на коллекторе до 30 *вт*. Наибольшее значение тока коллектора П4 равно 5 *а*, отдаваемая выходная мощность достигает 10 *вт* в режиме класса А.

Поперечное сечение мощного транзистора показано на рис. 14.

Выходные транзисторы получили наибольшее применение в схемах преобразователей напряжения, а также в выходных каскадах усилителей низкой частоты в режиме класса В.

Коэффициент полезного действия выходного усилителя на транзисторах в режиме класса В может теоретически достигать 78%. При использовании в таком усилителе двух транзисторов типа П4 можно получить неискаженную выходную мощность до 45 *вт*.

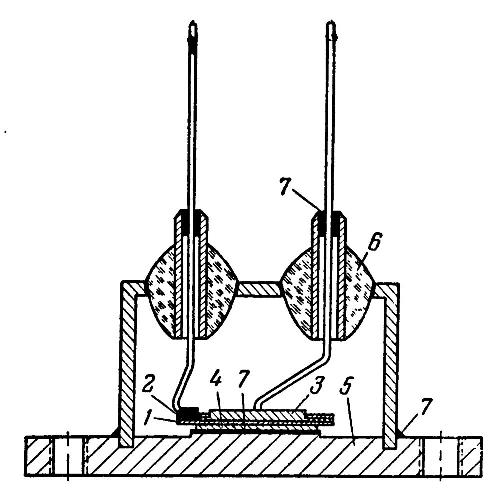


Рис. 14. Поперечное сечение одного из мощных транзисторов.

1 — пластинка германия; *2* — база; *3* — эмиттер; *4* — коллектор; *5* — медное основание; *6* — стеклянный изолятор; *7* — припой.

12. ПОИСКИ ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ПРЕДЕЛОВ ТРАНЗИСТОРОВ

Улучшение частотных свойств транзисторов стало одной из основных задач, без решения которой транзисторы были бы обречены на ограниченное применение.

Наиболее простым средством казалось использование очень тонких (порядка сотых долей миллиметра) пластинок германия с неглубоким проникновением легирующего сплава для создания, по возможности, плоских и параллельных переходов.

И действительно, этим способом удалось получить плоскостные маломощные транзисторы на предельные частоты до 20 *Мгц*. Однако точность их изготовления должна быть очень высокой и малейшие трудноопределимые отклонения от заданных размеров вызывают большие разбросы параметров транзисторов от образца к образцу. Поэтому после изготовления транзисторы сортируются на разновидности по предельным частотам усиления тока (обычно 5, 10 и 20 *Мгц*). Такие транзисторы выпускаются в настоящее время в ряде стран. В Советском Союзе на эти частоты выпускаются сплавные транзисторы типов П12 (5 *Мгц*), П406 (10 *Мгц*) и П407 (20 *Мгц*).

В 1952 г. была сделана попытка дальнейшего усовершенствования плоскостных транзисторов типа *n-p-n* путем устройства второго вывода базы с ее противоположной стороны. К двум выводам базы такого транзистора, названного тетродом с двойной базой (рис. 15), прикладывается небольшое напряжение. В результате уменьшается сопротивление базы, что приводит к повышению предельной частоты.

Транзистор описанного типа изготовляется не методом сплавления, а путем выращивания монокристалла из рас-

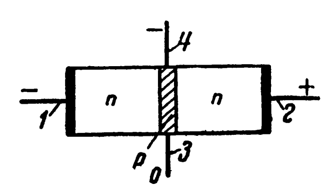


Рис. 15. Тетрод с двойной базой.
1 — эмиттерный электрод; *2* — коллекторный электрод; *3* — первый базовый электрод; *4* — второй базовый электрод.

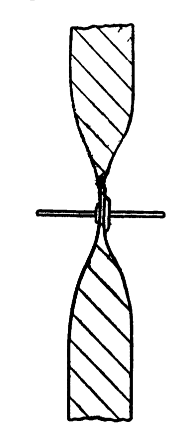


Рис. 16. Поперечное сечение германиевой пластинки поверхностно-барьерного транзистора.

плавленного германия при периодическом строго дозированном введении в расплав соответствующих примесей для получения проводимостей нужного типа. Предельные частоты тетродов с двойной базой достигают нескольких десятков мегагерц при условии получения достаточно тонкой базы. Широкого распространения они, однако, не получили из-за сложности изготовления таких приборов с очень тонкой базой.

В 1953 г. были разработаны первые образцы поверхностно-барьерных транзисторов, в конструкции которых путем электрохимического вытравливания двух лунок с противоположных сторон германиевой пластинки *n*-типа удается уменьшать толщину базового слоя до 5 *мк*. Затем электрогальваническим способом на поверхности лунок наносятся металлические электроды, к которым припаиваются контактные выводы (рис. 16). Существует распространенное мнение, что здесь, в сущности, уже нет электронно-дырочных переходов у эмиттера и коллектора, а образуются переходы металл — полупроводник, выполняющие функции обычных *p-n*-переходов за счет контакт-

ной разности потенциалов. В действительности все же электронно-дырочные переходы образуются, по-видимому, и в поверхностно-барьерном транзисторе.

Поверхностно-барьерные транзисторы обладают хорошими частотными свойствами. Они могут работать при небольших напряжениях коллектора ($3 \div 5$ *в*) на частотах порядка 60 и более *Мгц*. Существующие типы поверхностно-барьерных транзисторов допускают рассеивание на коллекторе лишь малой мощности, не превышающей нескольких милливатт.

В ходе дальнейших работ в 1954 г. был создан новый тип транзистора, принцип действия которого оказался весьма перспективным для работы на высоких частотах. По конструкции базы этот транзистор называется двухслойным или типа *p-n-i-p*, а по принципу действия — дрейфовым (рис. 17).

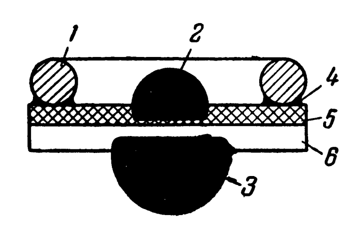


Рис. 17. Устройство дрейфового транзистора *p-n-i-p*-типа.
1 — базовое кольцо; 2 — эмиттерный электрод; 3 — коллекторный электрод; 4 —олово; 5 — низкоомная область; 6 — высокоомная область.

Пластинка германия толщиной около 50 *мк*, используемая в качестве базы состоит из слоя толщиной около 10 *мк* с проводимостью типа *n* и малым удельным сопротивлением, благодаря сильному легированию соответствующей примесью, и второго слоя толщиной около 40 *мк* (слоя *i*), практически беспримесного, имеющего высокое удельное сопротивление. После вплавления эмиттера со стороны сильно легированного слоя *n* типа, между образованным *p-n* переходом и беспримесным слоем с высоким удельным сопротивлением остается очень тонкая прослойка, толщина которой не превышает 5 *мк*.

Коллектор вплавляется с противоположной стороны пластинки в слой, обладающий высоким удельным сопротивлением. Наличие этого слоя уменьшает действующую емкость база — коллектор. При работе транзистора дырки, введенные эмиттером в слой *n*-типа, проходят через последний, как и в обычном плоскостном транзисторе, путем диффузии. Однако во втором беспримесном слое (в дрейфовой области), где нет или очень мало носителей зарядов, они ускоряют свое движение к коллектору под воздействием его электрического потенциала. Благодаря это-

му двухслойный дрейфовый транзистор может работать на высоких частотах, достигающих сотен мегагерц. Кроме того, коллекторные переходы дрейфовых транзисторов могут допускать, в зависимости от типа, рассеивание повышенной мощности (порядка единиц ватт) по сравнению с другими высокочастотными транзисторами. Несмотря на очевидную перспективность конструкции дрейфовых триодов типа *p-n-i-p*, производство таких транзисторов связано с серьезными технологическими трудностями, в первую очередь из-за сложности получения двухслойных пластин с точно заданными размерами и свойствами каждого слоя.

Поэтому исследования новых перспективных конструкций высокочастотных транзисторов продолжались с неослабевающей силой. Много внимания уделялось также и поискам конструкций транзисторов, основанных на принципе управления движением носителей зарядов электрическим полем. Было очевидно, что в случае успеха полупроводниковая электроника совершит решительный прорыв в область высоких частот и высокочастотные усилительные и генераторные транзисторы различных мощностей с электрическими параметрами, не уступающими параметрам электронной лампы, станут реальной действительностью.

13. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

Улучшение частотных характеристик германиевых приборов не устраняло другого присущего им крупного недостатка — нестабильности при повышении температуры окружающей среды. Для транзисторов одним из важных показателей стабильности их параметров является величина обратного тока коллекторной цепи ($I_{ко}$), вредно влияющего на режим ее работы. При повышении температуры коллекторного перехода германиевых маломощных транзисторов обратный ток коллекторной цепи (величина которого обычно не превышает нескольких микроампер) возрастает, что ухудшает свойства прибора. Если же температура перехода превосходит допустимую, то транзистор становится неработоспособным.

Практически температура коллекторных переходов современных германиевых транзисторов не должна превышать 100° С. С учетом разницы между температурами оболочки транзистора и коллекторного перехода (обычно порядка 30—40° С) допустимая температура поверхности корпуса германиевых транзисторов, при которой они остаются рабо-

тоспособными, находится в пределах от 40—50° С для мощных приборов до 70—80° С для маломощных приборов.

У германиевых выпрямительных диодов при повышении температуры окружающей среды возрастает величина обратного тока, что серьезно ограничивает возможность их применения. Практически рабочая температура германиевых диодов не должна превышать 85° С.

Применение монокристаллического кремния, обладающего сходной структурой с монокристаллическим германием, позволяет значительно улучшить температурные свойства полупроводниковых приборов.

Однако частотные свойства кремниевых приборов хуже, чем германиевых, так как в германии подвижность электронов при комнатной температуре в 3 с лишним раза превосходит подвижность электронов в кремнии.

Кремний широко распространен в природе в виде двуокиси и ее соединений, составляя 87% земной коры. Он плавится при температуре около 1 400° С (германий — при 940° С) и легко вступает в соединение с различными элементами. Если учесть, что в чистом кремнии может быть допущено не более одного атома примеси на 1 000 млрд. атомов кремния, то станет ясно, что получение чистого монокристаллического кремния связано с огромными трудностями.

Именно поэтому, несмотря на распространенность кремния, промышленный выпуск кремниевых приборов начался лишь в 1955 г. Особенно плодотворным оказалось применение кремния для изготовления выпрямительных элементов, так как это позволило не только повысить их рабочую температуру до 150—200° С, но и значительно увеличить допустимые обратные напряжения.

В 1955 г. выпускались кремниевые плоскостные выпрямительные диоды на выпрямленный ток 300 *ма* при обратных напряжениях до 600 *в*, а также силовые кремниевые диоды на ток до 40 *а* и обратные напряжения до 200 *в*, пригодные для работы при температуре перехода 190° С.

В каталогах и справочниках данные кремниевых выпрямительных диодов приводятся обычно для комнатной температуры окружающей среды. С повышением температуры эти данные соответственно ухудшаются. При наиболее высоких допустимых температурах кремниевые диоды еще сохраняют выпрямительные свойства. Однако степень ухудшения свойств кремниевых диодов (например, увеличение обратного тока), вызываемая повышением температуры, значительно меньше, чем у германиевых диодов.

Гораздо более стабильными оказались и параметры кремниевых транзисторов при изменении температуры. Так, например, обратный ток коллекторной цепи кремниевого триода при той же температуре во много раз меньше, чем у германиевого транзистора. С повышением температуры ухудшение свойств кремниевых транзисторов происходит значительно медленнее, чем у германиевых транзисторов, но и в этом случае при достижении предельных положительных температур транзистор сохраняет лишь работоспособность. Это хорошо иллюстрируется следующим примером: если при температуре 25° С допустимая наибольшая мощность, рассеиваемая коллектором кремниевого транзистора, равна 150 *мвт*, то при температуре 100° С она не должна превышать 50 *мвт*. С повышением же температуры до 150° С этот транзистор может работать лишь при очень малых нагрузках.

В 1955 г. кремниевые транзисторы еще не получили широкого распространения. Серийно выпускались лишь маломощные транзисторы на предельные частоты порядка 3 *Мгц*.

Однако перспективность кремниевых полупроводниковых приборов была вполне очевидна. Разработки новых типов кремниевых выпрямительных диодов и транзисторов различных назначений в сущности только начинались. Серьезное внимание было также обращено на поиски новых высокотемпературных полупроводниковых сплавов, превосходящих по своим свойствам кремний.

14. ФОТОДИОДЫ И ФОТОТРАНЗИСТОРЫ

При изготовлении полупроводниковых приборов пластинку монокристалла приходится всегда защищать от света, так как германий и кремний очень чувствительны к нему. При освещении кристалла кванты света сообщают дополнительную энергию некоторым электронам, что позволяет последним разорвать валентные связи. В результате проводимость кристалла увеличивается. Установлено, что один квант света при длине волны короче 1,6 *мк* создает в германии одну пару электрон — дырка.

Это свойство полупроводников оказалось полезным для изготовления полупроводниковых фотоэлементов.

На рис. 18 показано устройство точечного коаксиального германиевого фотодиода, созданного в 1952 г. Наибольшую чувствительность к свету имеет точка, находящаяся с противоположной стороны места соприкосновения пластинки германия с иглой. Поэтому лучи света фокусируются на этой точке при помощи специальной линзы. На корпус ме-

таллической гильзы—держателя пластинки германия и вывод иглы подается небольшое напряжение (минус на иглу) под действием которого ток, протекающий через *p-n*-переход, при освещении последнего увеличивается.

В дальнейшем появились и плоскостные фотодиоды, где фоточувствительной областью является непосредственно

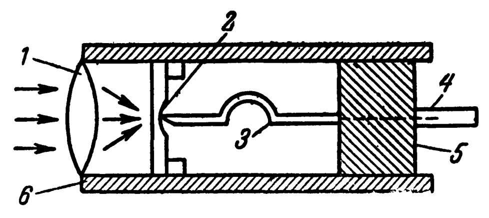


Рис. 18. Устройство точечного германиевого фотодиода.

1 — линза; *2* — пластинка германия; *3* — проволочка; *4* — вывод; *5* — изолирующая шайба; *6* — металлическая гильза.

p-n-переход. Схема их включения показана на рис. 19. Германиевый фотодиод обладает наибольшей чувствительностью при длине волны падающего света 1,5 *мк*, т. е. в инфракрасной области света.

Полупроводниковые фотоприборы могут быть изготовлены и с несколькими *p-n*-переходами. Известны, в частности, германиевые *p-n-p* сплавные фототриоды для применения в схемах, где при детектировании модулированного светового сигнала осуществляется усиление переменного тока.

Большой интерес представляют чувствительные к видимому свету кремниевые фотоэлементы, сочетания которых получили название «солнечных» батарей. Впервые такие

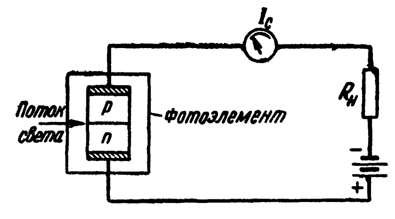


Рис. 19. Схема включения плоскостного фотодиода.

фотоэлементы были разработаны в 1953 г. Электронно-дырочный переход у кремниевого фотоэлемента образуется в результате нанесения на пластину монокристаллического кремния с электронной проводимостью слоя бора толщиной всего от 10^{-3} до 10^{-4} *мм*, который сообщает части кремния дырочную проводимость. Промышленные образцы кремниевых фотоэлементов имеют к. п. д. не менее 6%, а у отдельных образцов к. п. д. доходит до 11—13%.

Благодаря возможности как последовательного, так и параллельного их соединения кремниевые фотоэлементы могут успешно применяться для питания радиотехнической

аппаратуры. Пригодных для этой цели вакуумных фотоэлементов нет.

Перспективы широкого применения солнечных батарей в последние годы широко обсуждаются в периодической печати. И действительно, их появление открыло возможности преобразования и использования больших количеств даровой энергии солнца для самых разнообразных целей.

15. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ПРИЕМНО-УСИЛИТЕЛЬНЫХ И ГЕНЕРАТОРНЫХ ЛАМП И ТЕНДЕНЦИИ ИХ РАЗВИТИЯ

Появление полупроводниковых приборов не замедлило темпов развития вакуумных электронных приборов. По данным периодической печати в 1949 г. во всем мире выпускалось около 10,5 тыс. типов электровакуумных приборов (в том числе около 4 900 типов приемно-усилительных ламп), а в 1956 г. их стало 18,5 тыс. типов.

В 1957 г. во всем мире находилось в эксплуатации более 2 млрд. приемно-усилительных ламп.

Быстрое возрастание числа типов электровакуумных приборов сопровождалось крупными качественными изменениями. Миниатюрные и сверхминиатюрные бесцокольные лампы продолжали вытеснять лампы старых конструкций. Экономичность прямонакальных ламп повысилась в среднем в 4 раза благодаря усовершенствованию их конструкции и применению более эффективных катодов.

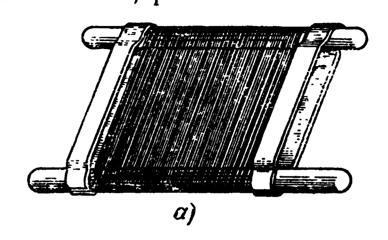
В современных телевизионных и радиовещательных приемниках широкое применение получили комбинированные лампы (двойные триоды, триод-пентоды, триод-гептоды и др.), что позволило уменьшить количество ламп в этих приемниках и снизить потребление ими электрической энергии в среднем на 30%. Этому способствовало также значительное повышение эффективности современных подогревных ламп.

В настоящее время сложилась единая мировая серия приемно-усилительных ламп для радиовещательной и телевизионной приемной аппаратуры, одинаковые типы которых выпускаются как в европейских странах, так и в США под разными названиями.

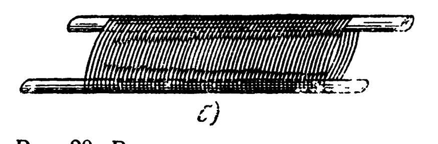
Это можно объяснить не только широким развитием экспорта телевизоров и радиовещательных приемников и необходимостью, следовательно, обеспечить возможность замены ламп в импортных телевизорах, но и хорошими параметрами этих ламп. Подавляющее большинство современных подогревных ламп приспособлено для работы при

анодных напряжениях от 170 до 200 *в*, благодаря чему легко осуществляется бестрансформаторное питание их анодных цепей при помощи выпрямителя на полупроводниковых приборах.

Улучшение свойств наиболее распространенных типов приемно-усилительных ламп — высокочастотных пентодов — характеризуется в первую очередь значительным повышением крутизны их характеристики и коэффициента широкополосности, равного отношению крутизны характеристики к сумме входной и выходной емкостей. Это обеспечило создание приемных устройств для работы в УКВ диапазоне.



а)



б)

Рис. 20. Рамочная сетка в сравнении с обычной.

а — рамочная сетка; *б* — обычная сетка лампы 6Ж1П.

Сравнительно недавнее усовершенствование конструкций миниатюрных ламп связано с дальнейшим уменьшением расстояний между электродами ламп, в первую очередь — между катодом и управляющей сеткой. Это оказалось возможным благодаря применению рамочных сеток из туго натянутых тонких проволок диаметром около 8 *мк* (рис. 20). Обладающие рекордными значениями крутизны характеристики лампы с рамочными сетками создавались в первую очередь для многоканальной аппаратуры радиорелейных линий, где для повышения надежности работы особенно важно было уменьшить количество одновременно работающих ламп.

Для сравнения в табл. 1 приведены величины крутизны характеристики (S) и коэффициента широкополосности (γ) старых и современных типов ламп.

К числу отечественных ламп с рамочными сетками относятся триод 6С3П с крутизной характеристики 19,5 *ма/в* и приведенные в таблице высокочастотный пентод 6Ж9П и выходной тетрод 6Э5П.

Так было наглядно показано, что потенциальные возможности приемно-усилительных ламп далеко не исчерпаны.

Таблица 1

Параметры	Старые типы			Современные типы				
	СО-124	6Ж8	6П3С	6Ж4П	6Ж5П	6Ж9П	6П14П	6Э5П
S, *ма/в*	2,0	1,65	6,0	5,2	9,0	17,5	11,0	30,5
$C_{вх}+C_{вых}$, *пф*	16,3	13,0	19,2	10,5	12,5	12	18	18,8
$\gamma=\frac{S}{C_{вх}+C_{вых}}$	0,125	0,127	0,315	0,495	0,72	1,46	0,612	1,62

Работы в этом направлении продолжают успешно развиваться.

В последнее время некоторые типы ламп с рамочными сетками (в первую очередь двойной триод ЕСС88 с крутизной характеристики 12,5 *ма/в*) благодаря успехам в их освоении начинают применяться и в массовой телевизионной аппаратуре.

Применение рамочных сеток и уменьшение межэлектродных расстояний — далеко не единственный путь повышения эффективности приемно-усилительных ламп. Хорошие параметры ламп могут быть получены и другими способами. Неплохие результаты, в частности, были получены благодаря введению так называемой катодной сетки, примененной впервые свыше 30 лет назад в лампе Микро ДС. Примером современной лампы с катодной сеткой является разработанный инж. Басистовым высокочастотный пентод с катодной сеткой типа 6Ж20П, являющийся по параметрам аналогом 6Ж9П. Лампы с катодной сеткой значительно проще изготовить, так как катодная сетка перемещает облако пространственного заряда электронов к управляющей сетке, создавая так называемый виртуальный катод, и расстояния между электродами лампы в этом случае могут быть значительно большими.

Другим вариантом лампы с катодной сеткой является выпущенный в США в 1956 г. низковольтный усилительный тетрод 12К5. Этот тетрод работает при одинаковых напряжениях накала анода и катодной сетки, равных 12,6 *в*. При анодном токе 8 *ма* его крутизна характеристики достигает 7 *ма/в*. Тетрод 12К5 входит в серию ламп, предназначенных для совместной работы с полупроводниковыми приборами в автомобильных приемниках, и служит для «раскачки» мощных выходных транзисторов.

Использование вторичной эмиссии для улучшения параметров приемно-усилительных ламп всегда казалось заманчивым. Однако попытки ее практического применения не давали ожидаемых результатов из-за высокого уровня шумов, вносимого вторично эмиссионным потоком электронов. Работы в этом направлении не прекращались и в последние годы дали положительные результаты. В периодической литературе в 1956—1957 гг. приведены данные нескольких типов таких ламп, в том числе пентода типа Z319, обладающего крутизной характеристики 19 *ма/в* и сравнительно невысоким уровнем шумов (эквивалентное сопротивление шумов, приведенное к первой сетке, равно 5 *ком*). У нас в Советском Союзе изготовляется пентод со вторичной эмиссией типа 6В1П, крутизна характеристики которого равна 29 *ма/в*. Лампы со вторичной эмиссией нашли преимущественное применение в импульсных схемах.

В связи с приспособленностью полупроводниковых приборов для низких питающих напряжений целесообразность дальнейшего применения электронных ламп в аппаратах для тугоухих и в автомобильных приемниках была поставлена под сомнение.

Несмотря на то, что в аппаратах для тугоухих могли применяться сверхминиатюрные экономичные прямонакальные лампы, последние были быстро вытеснены транзисторами, оказавшимися еще более экономичными благодаря отсутствию накала. В автомобильных приемниках замена высокочастотных ламп оказалась пока невыгодной из-за сравнительно высокой стоимости соответствующих транзисторов, вызванной сложностью их изготовления. Было найдено компромиссное решение, заключавшееся в создании серии низковольтных ламп для совместной работы с выходными транзисторами.

В 1957 г. в периодической литературе было описано 3 серии таких ламп. Одна из них выпущенная в Западной Европе состоит из четырех типов ламп, рассчитанных на анодные напряжения 12,6 и 6,3 *в*: высокочастотного пентода с удлиненной характеристикой (варимю) EF 97, триод-гептода ECH 83, двойного диода-пентода EBF 83 и низкочастотного пентода EF 98. Характерно, что, несмотря на низкие анодные напряжения, эти лампы обладают неплохими свойствами.

Так например, при анодном напряжении 12,6 *в* крутизна характеристики пентодов EF 97 и EF 98 достигает соот-

ветственно 1,8 и 3 *ма/в*, а крутизна преобразования гептодной части ЕСН 83 (в режиме смесителя) равна 0,22 *ма/в*.

Получение хороших параметров этих низковольтных ламп оказалось возможным и без применения вспомогательной катодной сетки. Однако для этого потребовалось соответственно увеличить густоту управляющей сетки и изменить конфигурацию третьей (антидинатронной) сетки так, чтобы ее поле более успешно боролось с упругим отражением электронов от анода, возникающим при низких напряжениях. Решающее значение имело значительное уменьшение расстояний между катодом и экранной сеткой.

Однако приемно-усилительные лампы даже с улучшенными параметрами все же недостаточно надежны в эксплуатации, в первую очередь из-за наличия накаливаемого катода. Оценка качества изготовленной партии ламп, как правило, производится по среднему сроку их службы, что не исключает случаев непригодности отдельных экземпляров ламп в результате перегорания подогревателя, ухудшения вакуума и пр. Поэтому для особо ответственных установок, где непредвиденный выход из строя лампы может привести к тяжелым последствиям, были сконструированы и освоены в производстве специальные типы ламп, удовлетворяющие повышенным требованиям в отношении надежности работы.

В течение последнего десятилетия были опубликованы данные о нескольких сериях таких ламп, к которым относятся: серия «пять звездочек», «голубая» серия, «красная» серия, серия ламп с колбами из температуростойкого стекла и др.

Одна из наиболее многочисленных серия ламп с маркой «пять звездочек» обладает конструкцией, обеспечивающей высокую сопротивляемость ударам и вибрации. Для этих ламп оговаривается гарантия безаварийной работы в течение определенного срока. Характер их производства отличается от производства обычных ламп строгим дозированием применяемых материалов, стерильной частотой и высокой точностью изготовления и сопряжения деталей (рис. 21). Естественно, что стоимость ламп повышенной надежности значительно выше стоимости обычных ламп.

В некоторых устройствах, например в кабельных телефонных усилителях, находящихся на дне океана, должны применяться только очень долговечные лампы. В результате длительных работ были созданы лампы со сроком

службы до 100 и 200 тыс. *ч*. Такие долговечные лампы отличаются от обычных ламп специальной конструкцией и применением более надежных катодов, а также — особо чистых материалов и благородных металлов. Технология их изготовления характеризуется особой тщательностью и увеличенной длительностью, рассчитанными на исключе-

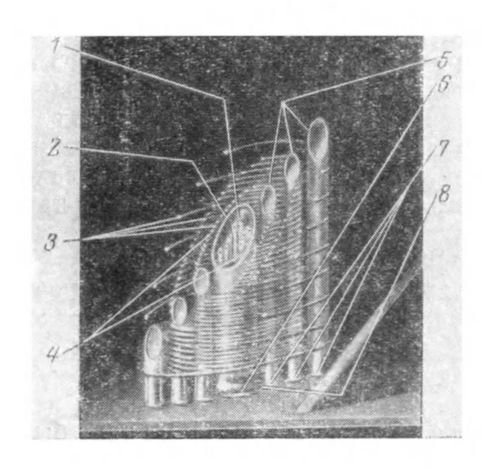


Рис. 21. Особенности конструкции миниатюрных ламп, входящих в серию „пять звездочек".

1 — подогреватель (диаметр проволоки определяется по ее весу; кусок проволоки длиной 200 *мм* должен весить 4,5 *мг* с отклонениями в пределах ± 1%); *2* — катод (диаметр 0,76 *мм* с точностью ± 13 *мк*; точность покрытия катода определяется по изменению веса, которое не должно отклоняться более чем на ± 0,25 *мг* на 1 *см*²); *3* — сеточная проволока (диаметр 25,4 *мк*; контролируется по весу, который не должен изменяться более чем на ± 1,5 миллионных частей для отрезка длиной 25 *мм*; сетка № 1 из посеребренного вольфрама; сетка № 2 — из позолоченного вольфрама; сетка № 3 — молибденовая); *4* — сеточные допуски (по наименьшему расстоянию): для сеток № 1 и 2 — по ± 18 *мк*; для сетки № 3 — ± 50 *мк*; *5* — сеточные опорные стержни (траверсы) — отклонения по диаметру в пределах ± 4 *мк*; *6* — отверстие в слюде для установки катода — отклонение по диаметру в пределах ± 6 *мк*; *7* — отверстие в слюде для закрепления сеточного стержня — отклонение по диаметру в пределах ± 13 *мк*; *8* — расстояние между отверстиями в слюде для закрепления катода и сеточных стержней, определяющее расстояние между катодом и сеткой, может изменяться не более чем на ± 6 *мк*.

ние всяких случайностей, могущих ухудшить качество лампы. Важным условием достижения длительного срока службы является также сохранение внутри оболочки лампы высокой степени вакуума, достигающей 10^{-8} *мм рт. ст.* Некоторые типы ламп для аппаратуры подводного кабеля перед установкой предварительно тренируются в течение 5 лет. Изготовители долговечных ламп сами комплектуют лампами усилители для подводного кабеля, проверяют их и участвуют в их установке и погружении в воду. В слу-

чае порчи аппаратуры по вине ламп поставщик последних возмещает расходы по подъему кабеля.

В последние годы зарубежная периодическая печать уделяет много внимания обеспечению стойкости электронных ламп в условиях сильного нагрева, вибрации и ударов в компактной радиоэлектронной аппаратуре, смонтированной в реактивных самолетах, управляемых снарядах и атомных реакторах.

В тяжелые температурные условия попадают также электронные приборы, используемые для измерений на дне очень глубоких нефтяных скважин (свыше 3 *км*). Создание электронных ламп, пригодных для работы при высоких окружающих температурах, шло несколькими путями.

К первому, наиболее простому способу относится применение колб из тугоплавкого стекла, замена слюдяных внутриламповых изоляторов керамическими, покрытие штырьков ламп золотом для улучшения контактов с гнездами ламповых панелей и пр. Лампы этой серии надежно работают при температуре колбы до 300° С (вместо 150° С для обычных миниатюрных ламп) и выдерживают вибрацию на частотах от 5 до 2 000 *гц* с ускорением до 20 *g*. В настоящее время опубликованы сведения о серийном производстве таких ламп.

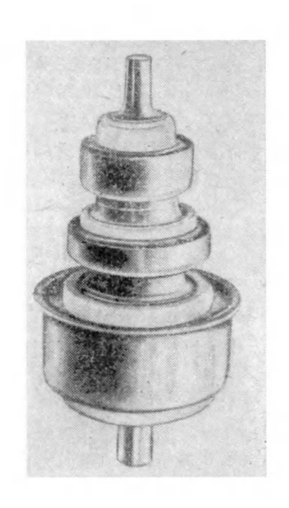
Освоение металлокерамических спаев позволило перейти к созданию миниатюрных металлокерамических триодов с дисковыми коаксиальными выводами и очень малыми расстояниями между электродами для работы в короткой части дециметрового диапазона волн взамен металлостеклянных «маячковых» ламп.

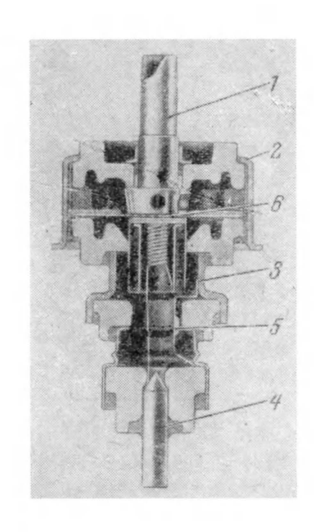
Одной из первых ламп такой конструкции был миниатюрный металлокерамический триод GL-6299, разработанный в США в 1954 г. и предназначенный для работы в диапазоне частот до 3 000 *Мгц* (рис. 22). Диаметр этой лампы равен 12 *мм*. Основной ее особенностью является небольшой уровень собственных шумов (8 *дб* при 1 200 *Мгц* и 2,5 *дб* при 108 *Мгц*), благодаря чему она применена во входных каскадах приемных устройств, предназначенных для регистрации сигналов передатчика, установленного на первом американском спутнике Земли.

Мощность этого передатчика, работающего в диапазоне 108 *Мгц*, составляла всего 10 *Мвт*.

Большой интерес вызвали сообщения о разработках так называемых «штабельных» металлокерамических ламп, являющихся серьезным шагом вперед по сравнению с су-

ществующими конструкциями. Они имеют форму цилиндра, составленного из ряда керамических кольцевых прокладок, спаянных с металлическими кольцами, на которых крепятся электроды. Выводы электродов расположены радиально (рис. 23). Штабельные лампы обладают высокой прочностью, очень большим сроком службы и могут работать при окружающей температуре порядка 300—400° С. Особенности конструкции штабельных ламп делают их





(а б)

Рис. 22. Металлокерамический триод GL-6299.

а — внешний вид; *б* — разрез (*1* — вывод анода; *2* — вывод сетки; *3* — вывод катода; *4* — вывод подогревателя; *5* — газопоглотитель; *6* — поверхность катода).

пригодными для автоматической сборки. В периодической литературе опубликованы описания первых нескольких типов штабельных ламп, в том числе двойных триодов СД-16 и СД-18, пентода высокой частоты 5С2А, выходной лампы СД-22 и др.

В ходе разработок штабельных металлокерамических ламп были созданы первые титанокерамические лампы, что открыло новые перспективы в развитии вакуумных электронных ламп. В этих лампах используются спаи колец монолитной вакуумнонепроницаемой керамики с титановыми кольцами, на которых крепятся электроды ламп. Благодаря хорошим газопоглотительным свойствам титана, при его нагревании, титанокерамические лампы при вы-

соких температурах работают еще лучше. Это дало основание предложить своего рода «безнакальные» титанокерамические лампы — с катодами без подогревателей.

Для получения эмиссии с катода такие лампы должны быть нагреты до температуры красного каления — примерно до 700° С. Титанокерамические «безнакальные» лампы могут применяться, например, на реактивных самолетах, где их можно нагревать от выхлопных газов двигателей. По экономичности они могут соперничать с полупроводниковыми приборами.

Применение титанокерамических спаев в сочетании с рамочными сетками из сверхтонких проволок позволяет

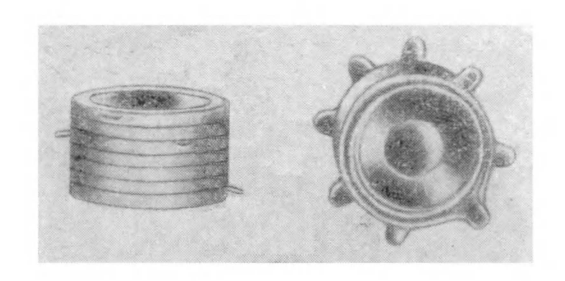


Рис. 23. Штабельный металлокерамический двойной триод.

резко уменьшить расстояния между электродами ламп и продвинуть вакуумные триоды в область сантиметровых волн.

На рис. 24 показано последовательное уменьшение габаритных размеров и расстояний между катодом и первой сеткой, а также между соседними проволоками сеток приемно-усилительных ламп с рамочными сетками. Черные кружочки изображают сеточные проволоки. Перекрестной штриховкой показано активное покрытие катода.

В 1954 г. в США были изготовлены образцы сверхминиатюрного титанокерамического триода 6BY4 (рис. 25). По размерам он меньше GL-6299 (диаметр лампы не превышает 8 *мм*), но по параметрам уступает ему.

Так, например, крутизна характеристики 6BY4 в 2 раза ниже (6 *ма/в* вместо 12 *ма/в*), а коэффициент собственных шумов значительно выше, чем у GL-6299.

Выпускаемый в Советском Союзе миниатюрный титанокерамический триод 6С17К с дисковыми коаксиальными

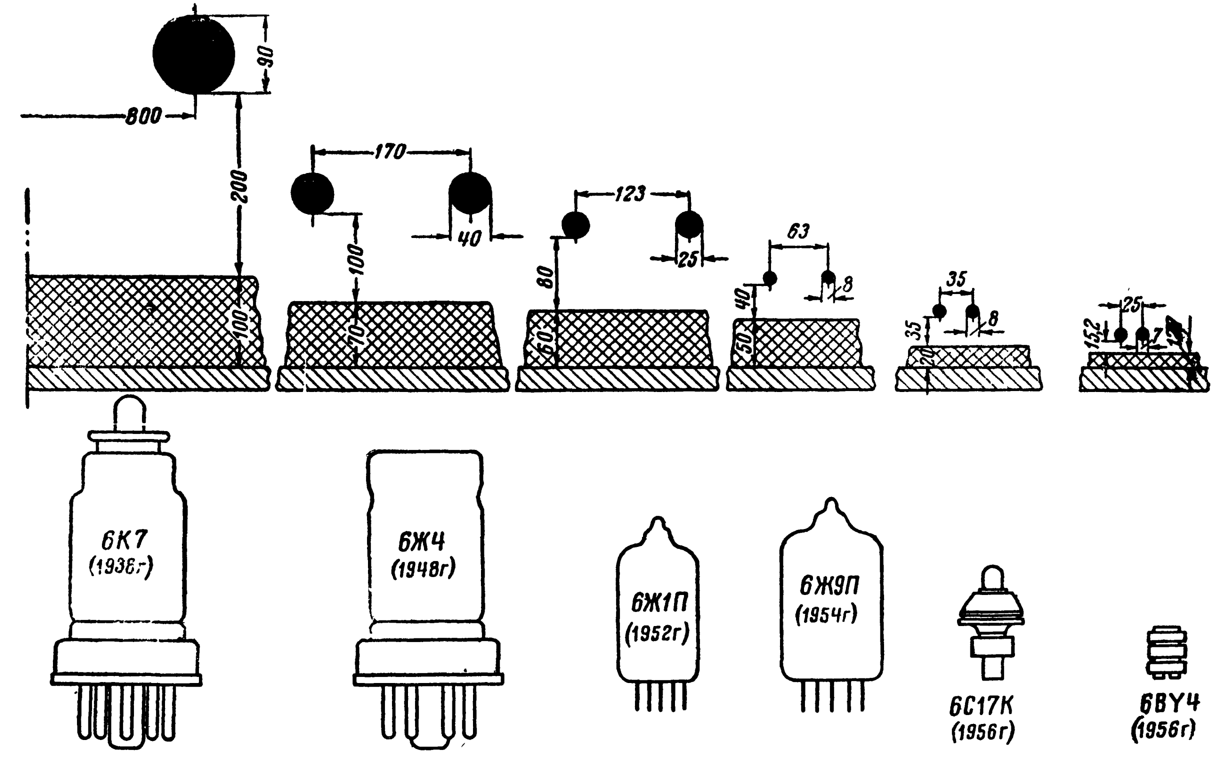


Рис. 24. Габаритные размеры и расстояние между электродами приемно-усилительных ламп (размеры даны в микронах).

выводами (рис. 26) превосходит GL-6299 и 6BY4, так как по электрическим параметрам он не хуже GL-6299, а по конструкции лучше 6BY4.

Серьезные изменения произошли и в конструкциях обычных генераторных ламп. Благодаря применению кольцевых выводов электродов и уменьшению расстояний между последними большинство современных типов генераторных ламп пригодно для работы в метровом диапазоне волн Резко увеличились мощности генераторных ламп, превосходящие 1 000 *квт*.

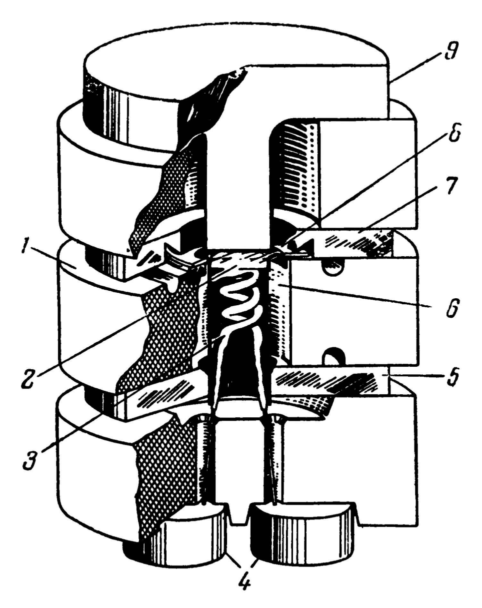


Рис. 25. Титанокерамический триод 6BY4.

1 — опорная плоскость; *2* — катод; *3* — подогреватель; *4* — выводы подогревателя; *5* — катодное кольцо; *6* — поддерживающий цилиндр; *7* — сеточное кольцо; *8* — сетка; *9* — анод.

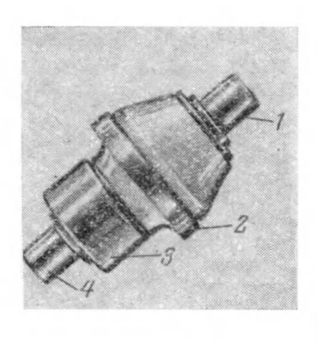


Рис. 26. Титанокерамический триод 6С17К.

1 — анод; *2* — сетка; *3* — катод; *4* — подогреватель.

Наиболее мощные лампы имеют разборные или полуразборные конструкции, позволяющие заменять поврежденные или изношенные части.

С повышением мощности генераторных ламп стали острее чувствоваться недостатки двух общепринятых систем принудительного охлаждения анода—водяного и воздушного. Обычно на аноде рассеивается около 30% мощности, подводимой к лампе. Однако довольно часто (например, при выключении нагрузки) анод подвергается очень большим местным перегрузкам, когда воздушное дутье или циркуляция охлаждающей жидкости оказываются недостаточно эффективными. Тогда возникающие местные перегревы приводят к частичным проплавлениям анода и порче лампы.

В 1950 г. были предложены вапотроны—генераторные лампы, в которых для охлаждения анода используется явление парообразования жидкости. В лампах с обычным вертикальным внешним металлическим анодом при закипании охлаждающей жидкости анод окружается паровой оболочкой. В результате контакт анода с водой нарушается, что приводит к катастрофическим последствиям. В вапотроне внешняя часть анода имеет выступы с большой теплопроводностью, которые прорывают паровую оболочку и обеспечивают контакт с жидкостью.

В первых конструкциях вапотрона внешняя часть анода имела вид ананаса с медными шипами, припаянными к медному цилиндру. В современных вапотронах аноды вместе с выступами изготовляются из одного куска меди.

Если при старом способе водяного охлаждения разрушение лампы происходило при рассеянии 100 *вт* мощности на 1 $см^2$ поверхности анода, то вапотроны нормально работают в кипящей воде при рассеянии до 120 *вт* мощности на 1 $см^2$ и легко выдерживают перегрузки даже до 250 *вт* на 1 $см^2$. Благодаря этому объем и вес генераторных ламп с новой системой охлаждения могут быть значительно снижены.

В настоящее время вапотроны нашли широкое применение в ряде стран в промышленных генераторных установках, используемых для нагрева и плавки различных материалов.

Созданы серии тетродов, обладающих сравнительно высокими коэффициентами усиления. Некоторые из них имеют коаксиальную металлокерамическую конструкцию и могут работать в диапазоне до 1 000 *Мгц*. Переход на титанокерамические спаи перспективен и для мощных ламп и позволит, по-видимому, повысить их предельные частоты и мощности.

16. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ. ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ И ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ (ЛБВ И ЛОВ). МОЩНЫЕ КЛИСТРОНЫ

В последнее десятилетие дальнейшее плодотворное развитие получило применение принципа группирования электронного потока в сверхвысокочастотных приборах, так удачно использованного в магнетронах и отражательных клистронах.

Благодаря этому сверхвысокочастотные генераторные и усилительные лампы вступили в очень интересный период, который характеризуется качественным скачком от узкополосных приборов резонансного типа к широкополосным приборам нерезонансного типа с электрической перестройкой частоты, что открыло новые перспективы перед радиоэлектроникой

Новым классом ламп этого рода являются лампы бегущей волны (сокращенно ЛБВ). В лампе бегущей волны при помощи электронного прожектора создается узкий пучок электронов, пролетающий сквозь металлическую спираль и улавливаемый затем коллектором (рис. 27).

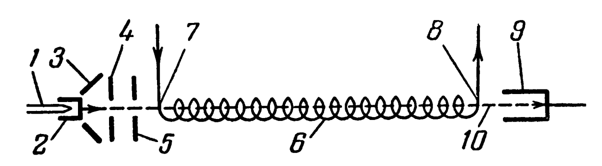


Рис. 27. Схема лампы бегущей волны.

1 — подогреватель; *2* — катод; *3* — фокусирующий электрод; *4* — первый анод; *5* — второй анод; *6* — спираль; *7* — входной конец спирали; *8* — выходной конец спирали; *9* — коллектор; *10* — поток электронов.

Поток электронов фокусируется при помощи постоянного магнитного поля, направленного вдоль оси спирали.

Усиливаемые электромагнитные колебания подаются через волновод на входной конец спирали, находящийся у электронного прожектора.

Хотя скорость движения электромагнитной волны близка к скорости света, но ей приходится следовать вдоль витков спирали, в то время как путь электронного пучка короче во столько раз, во сколько длина прямого проводника больше длины свернутой из него спирали. Благодаря этому спираль замедляет скорость движения электромагнитной волны так, что она перемещается несколько медленнее электронного пучка.

Во время работы лампы одна часть электронов пучка на различных участках его пути будет подвергаться воздействию ускоряющих зон электромагнитного поля, а другая часть — тормозящих зон того же поля. В результате электроны будут группироваться по скорости в сгустки, движение которых, в свою очередь, будет возбуждать вокруг спирали электромагнитную волну, совпадающую по фазе с первоначальной. Усиленная электромагнитная волна снова воздействует на электронный пучок и т. д. На конце спирали

мощность электромагнитной волны может возрасти во много раз. Таков основной принцип действия ЛБВ. Лампа бегущей волны используется большей частью в качестве усилителя сверхвысокочастотных колебаний, воспроизводящего широкую полосу частот порядка нескольких сот мегагерц.

В настоящее время лампы бегущей волны представляют многочисленное семейство широкополосных сверхвысокочастотных усилителей и генераторов, состоящее из большого количества типов различных назначений.

К ним относятся маломощные высокочувствительные ЛБВ с низким коэффициентом шума (порядка 6 *дб* в десятисантиметровом диапазоне волн), применяемые во входных каскадах радиотехнических устройств, выходные ЛБВ средней мощности (порядка десятков и сотен ватт) для аппаратуры радиорелейных линий и других назначений, гибридные конструкции ЛБВ (сочетания ЛБВ с прямопролетным или с отражательным клистронами), электронно-волновые лампы с двумя электронными лучами, из которых один луч выполняет функции замедляющей системы, ЛБВ — умножитель частоты и пр. В периодической литературе описана также импульсная ЛБВ мощностью до 3 *Мвт* на частоте 2 850 *Мгц* с к. п. д. выше 30%.

Исследования ламп бегущей волны привели к созданию лампы обратной волны (сокращенно ЛОВ), известной за рубежом под названием карсинотрон (от греческого слова каркинос — рак).

В лампе обратной волны пучок электронов и электромагнитная волна движутся не в одном направлении, как в ЛБВ, а навстречу друг другу. В качестве замедляющей системы в ЛОВ используется так называемая гребенка, представляющая собой медный брусок с поперечными щелями — резонаторами, напоминающими зубья гребенки. В отличие от ЛБВ вывод энергии ЛОВ находится со стороны электронного прожектора (рис. 28). Частота генерируемых колебаний определяется скоростью электронов, сгруппированных в сгустки под воздействием полей у щелей-резонаторов, вдоль которых пролетают электроны. При изменении анодного напряжения скорость электронов, а следовательно, и частота колебаний также изменяются. Благодаря этому в лампах обратной волны возможна плавная электронная перестройка частоты в широких пределах.

Наибольшее распространение получили гетеродинные лампы обратной волны, в том числе ЛОВ с выходной

мощностью около 1 *вт*, перекрывающие диапазон частот от 2 000 до 4 000 *Мгц* (от 15 до 7,5 *см*) и предназначенные для аппаратуры радиорелейных линий. По оценке зарубежной периодической печати при современном уровне сверхвысокочастотной электронной техники возможно создание ЛОВ, работающих в диапазоне от 1 тыс. до 200 тыс. *Мгц* (от 30 *см* до 1,5 *мм*). Описаны также варианты мощных ЛОВ, известные под названием ламп обратной волны магнетронного типа и предназначенные как для непрерывной, так и для импульсной работы. В диапазонах частот от 1 тыс. до 10 тыс. *Мгц* (от 30 до 3 *см*) по той же оценке осуществимы ЛОВ магнетронного типа с мощностями от 300 *квт* до 5 *Мвт* в импульсном режиме и от 300 *вт* до 10 *квт* в режиме непрерывного действия.

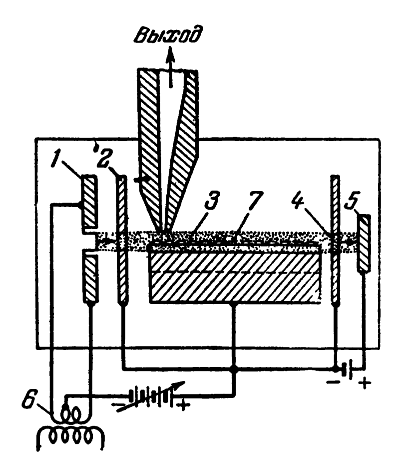


Рис. 28. Устройство лампы обратной волны.

1 — катод; *2* — анод; *3* — электронный поток; *4* — диафрагма; *5* — коллектор; *6* — питание накала; *7* — заземляющая система.

За истекшие годы одним из наиболее многочисленных классов электровакуумных приборов стали магнетроны.

В различных странах выпускаются сотни типов магнетронов с импульсными мощностями (по опубликованным данным) от 60 *квт* на волне 4 *мм* до 5 *Мвт* на волне 10 *см* и до 10 *Мвт* на волне 25 *см*. Появилось также большое количество различных видоизменений магнетронов, в том числе маломощные магнетроны с широким диапазоном электронной настройки путем изменения анодного напряжения.

В последнее время создан новый мощный прибор магнетронного типа — платинотрон (от греческого слова «платис» — плато, трактуемого как широкополосный), различные модификации которого могут работать как в качестве генераторов (стабилитроны), так и в качестве усилителей (амплитроны).

Платинотронный усилитель — амплитрон — оказался весьма эффективным прибором, пригодным для работы в сантиметровом и дециметровом диапазонах волн. Его

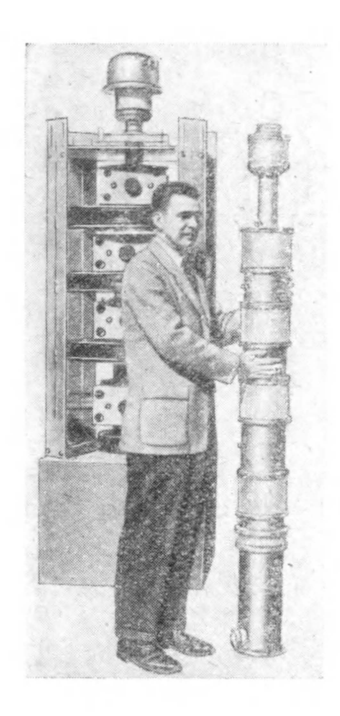


Рис. 29. Клистрон непрерывного действия мощностью 75 *квт* и шкаф с фокусирующей системой для его установки.

к. п. д. достигает 70%, что превосходит к. п. д. магнетронов, полоса частот около 10%, а импульсная мощность не уступает мощности магнетронов.

Широкое применение нашли также отражательные клистроны благодаря их способности работать как в сантиметровом, так и в миллиметровом диапазонах волн. В настоящее время опубликованы данные отражательного клистрона, отдающего в диапазоне 4 *мм* полезную мощность 70 *мвт*.

Серьезными конкурентами магнетронов стали прямопролетные усилительные многорезонаторные клистроны. Усилительные клистроны, работающие по принципу независимого возбуждения, в отличие от генераторов с самовозбуждением, какими являются магнетроны, обеспечивают высокую стабильность частоты генерируемых колебаний и могут включаться для параллельной работы.

Трехрезонаторный клистрон обладает коэффициентом усиления мощности до 30—35 *дб* и представляет собой двухкаскадный усилитель. Добавление каждого следующего резонатора прибавляет еще одну ступень усиления. Поэтому коэффициент усиления мощности достигает в четырехрезонаторном клистроне 50 *дб*, а в пятирезонаторном 60—70 *дб*. Для возбуждения таких клистронов требуются небольшие мощности, что является одним из основных их преимуществ. Так, например, для возбуждения клистрона с коэффициентом усиления 40 *дб* и выходной мощностью 20 *квт* необходима мощность, равная всего 1 *вт*.

Однако для питания усилительных клистронов нужны очень высокие напряжения, достигающие 150 и более киловольт.

В настоящее время известны импульсные клистроны, развивающие мощности порядка десятков мегаватт, а также

клистроны непрерывного действия с мощностью до 75 *квт*.

Мощные клистроны отличаются большими размерами. Длина некоторых из них превосходит рост человека. Поэтому они выполняются большей частью в виде разборных конструкций и монтируются вместе с вакуумными насосами (рис. 29).

В кратком обзоре невозможно даже перечислить полностью все многочисленные виды современных сверхвысокочастотных приборов, количество которых продолжает непрерывно увеличиваться. Общим для основных направлений развития сверхвысокочастотных электронных приборов является быстрое увеличение импульсных и непрерывных мощностей, расширение полосы или коэффициента электронной перестройки усиливаемых и генерируемых частот, повышение к. п. д. и коэффициента усиления мощности, а также освоение диапазона миллиметровых волн.

Нет сомнения, что в недалеком будущем сверхвысокочастотная электроника успешно освоит и субмиллиметровые волны вплоть до световых волн.

17. МОЛЕКУЛЯРНЫЕ И АТОМНЫЕ КВАНТОВОМЕХАНИЧЕСКИЕ УСИЛИТЕЛИ И ГЕНЕРАТОРЫ

Успехи физики твердого тела привели к открытию принципиально новых способов усиления и генерирования сверхвысокочастотных колебаний, основанных на взаимодействии электромагнитных полей не с потоком электронов, как в уже известных электронных приборах (магнетронах, клистронах и ЛБВ), а с незаряженным веществом — молекулами. При этом внутренняя энергия молекул непосредственно превращается в сверхвысокочастотную энергию. Нечто подобное происходит в газоразрядных лампах, например неоновых или аргоновых, где в результате возбуждения электронов нейтральных атомов газа происходит превращение их внутренней энергии в электромагнитную энергию, излучаемую в виде света. Однако это световое излучение возникает самопроизвольно (спонтанно), в то время как для преобразования внутренней энергии молекул последние должны быть специально возбуждены в высокочастотном поле.

Молекулам согласно квантовой теории свойственны определенные энергетические состояния или уровни, в зависимости от которых они могут взаимодействовать с электромагнитным полем излучения лишь соответствующей частоты. При этом молекулы или поглощают энергию из электро-

магнитного поля, переходя в результате ее накопления в новое энергетическое состояние с большей энергией, или отдают часть своей внутренней энергии, переходя в состояние с меньшей энергией. Система молекул, т. е. часть вещества, будет поглощать или излучать энергию в зависимости от энергетического состояния большей части молекул.

Устройство, переводящее бо́льшую часть молекул в такое энергетическое состояние, при котором они отдают свою энергию электромагнитному полю, является молекулярным усилителем.

В одном из первых молекулярных усилителей пучок молекул аммиака физически разделялся на два пучка: один с большей энергией (так называемое верхнее энергетическое состояние) и другой с меньшей энергией (нижнее энергетическое состояние). Использовался пучок молекул с большей энергией, который направлялся в объемный резонатор, где, взаимодействуя с электромагнитным полем сверхвысокой частоты, отдавал ему свою энергию.

При создании соответствующей обратной связи можно получить молекулярный генератор, обладающий исключительно высокой стабильностью частоты. Эта особенность, а также ничтожно малый уровень собственных шумов молекулярного усилителя, обусловленный электрической нейтральностью молекулярного пучка, вызвали особый интерес к молекулярным усилителям и генераторам.

Принцип молекулярного усиления получил за рубежом название «Масер», составленное из заглавных букв английских слов, означающих «усиление микроволн стимулированной эмиссией излучения».

В результате дальнейших успехов атомной физики были созданы атомные усилители на основе парамагнитного резонанса в твердых веществах, открытого в 1944 г. в Казани Е. К. Завойским, так называемые усилители «твердого состояния». Действие атомного усилителя, называемого часто «спиновым», основано на использовании спинов электронов (спин — собственный механический момент количеств движения электрона), вращающихся в магнитном поле в парамагнитной кристаллической решетке. Спинам свободных электронов атомов также свойственны различные энергетические состояния. Для преобразования внутренней энергии атома должна быть использована разница в количествах спинов, находящихся на разных энергетических уровнях.

В атомном усилителе используется небольшой кристалл парамагнитной соли, находящейся в объемном резонаторе. Последний погружается в криостат с жидким гелием между полюсами электромагнита. Благодаря этому устройство работает при сверхнизкой температуре, близкой к абсолютному нулю: около 1,2° К.

Если приложить слабый сигнал на частоте, соответствующей разности энергии двух уровней (энергетических состояний) спинов, то возникнет усиление мощности и соответствующее излучение сверхвысокочастотной энергии. Изменение величины магнитного поля вызовет изменение энергии электронных спинов, что, в свою очередь, приведет к изменению частоты излучения. Свойства спиновых усилителей и генераторов, называемых часто парамагнитными мазерами, зависят от ряда условий, в первую очередь от свойств примененного кристалла твердого парамагнитного вещества. В описанных образцах спиновых усилителей использовались различные материалы, известные под названием «ионосвязанные парамагнитные соли». Согласно оценке периодической печати атомные усилители могут быть созданы для работы в диапазоне частот до 100 тыс. *Мгц* (3 *мм*). Уровень их собственных шумов на частоте 10 тыс. *Мгц* (3 *см*) при охлаждении в жидком гелии характеризуется величиной 0,06 *дб*, в то время как коэффициент шумов ЛБВ на той же частоте достигает 9,5 *дб*.

Хотя атомные усилители развивают очень небольшие мощности, достигающие долей ватта, но их малый шумфактор, позволяющий резко повысить чувствительность радиоприемных сверхвысокочастотных устройств, делает их незаменимыми для ряда применений. Свойственная молекулярным и атомным генераторам сверхвысокая стабильность частоты, значительно превосходящая стабильность частоты кварцевых резонаторов, позволяет при их помощи создать эталонные устройства для точной проверки частоты и решать ряд других задач современной радиотехники.

Последующие исследования показали, что могут быть созданы более мощные сверхвысокочастотные усилители, основанные на использовании параметрического резонанса в ферромагнитных твердых материалах, открытого Л. И. Мандельштамом и Н. Д. Папалекси. Ферромагнитные усилители сходны со спиновыми, но могут работать и при комнатной температуре.

В настоящее время ведутся интенсивные исследования в области атомных усилителей и генераторов, некоторые

сведения о которых иногда публикуются в периодической печати. В частности, сравнительно недавно в одном из подобных сообщений содержалось утверждение о возможности создания «твердого» магнетрона.

Атомные усилители и генераторы развиваются быстрыми темпами. Ближайшее будущее может принести интересные сюрпризы.

18. ОСНОВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ТЕНДЕНЦИИ ИХ РАЗВИТИЯ

В течение 1956—1957 гг. удельный вес полупроводниковых электронных приборов продолжал неуклонно увеличиваться.

В ходе научных исследований в области полупроводниковой электроники и разработок новых типов полупроводниковых приборов были достигнуты серьезные успехи.

К началу 1957 г. выпускалось уже свыше 400 типов транзисторов.

Значительно возросло также количество разновидностей полупроводниковых выпрямительных диодов. Наибольшее распространение получили кремниевые выпрямительные диоды, ставшие грозными конкурентами маломощных кенотронов и низковольтных газоразрядных приборов.

Современные кремниевые выпрямительные диоды выдерживают большие обратные напряжения на одном *p-n*-переходе.

В периодической печати опубликованы данные кремниевых диодов, рассчитанных на обратные напряжения 1 000 и 1 500 *в* и средние значения прямых токов до 1 *а* при температуре 125° С.

Выпущены также выпрямительные столбики из последовательно соединенных кремниевых элементов на напряжения до 16 *кв* для питания электронно-лучевых трубок. Описаны мощные кремниевые диоды на выпрямленный ток 250 *а* и обратные напряжения до 500 *в*, при температуре 125° С. Благодаря этому полупроводниковые выпрямительные установки стали вытеснять газоразрядные вентили на электровозах железных дорог, контактная сеть которых питается переменным током.

Значительно улучшены точечные кремниевые диоды. Так, например, отечественный точечный кремниевый диод типа Д101 имеет небольшой обратный ток, равный всего

10 *мка* при обратном напряжении 75 *в*, что соответствует обратному сопротивлению 7,5 *Мом*. Выпрямленный ток Д101 равен 30 *ма*.

Применение в кремниевых диодах золотых контактов с кристаллом позволило повысить их проводимость в прямом направлении и значительно уменьшить обратные токи.

Высокая стабильность электронно-дырочных переходов на кремниевой основе позволила создать еще один вид кремниевого диода — кремниевый стабилитрон, зависимость обратного тока которого используется для стабилизации питающего напряжения радиоэлектронных устройств на полупроводниковых приборах. Они оказались хорошим дополнением к стабилизаторам напряжения тлеющего разряда, непригодным для низких напряжений.

В результате поисков новых способов получения малой толщины базового слоя транзисторов был разработан диффузионный метод создания электронно-дырочных переходов, основанный на использовании разных коэффициентов диффузии легирующих примесей, которые вследствие этого проникают в полупроводниковое вещество на разную глубину.

Преобладание того или иного легирующего материала дает соответствующий характер проводимости.

Из показанной на рис. 30 характеристики неоднородного распределения примесей в германиевых диффузионных транзисторах видно, что, по существу, они являются разновидностью дрейфового транзистора, описанного ранее. В этих транзисторах эмиттерный и базовый электроды расположены со стороны сильно легированной поверхности германиевой пластинки *p*-типа, а коллекторный электрод — с противоположной нелегированной стороны, прилегающей к ножке транзистора, что обеспечивает хороший теплоотвод коллекторному переходу. Изготовляемые в Советском Союзе диффузионные германиевые транзисторы П401, П402 и П403 обладают наибольшими частотами генерирования соответственно 30, 60 и 120 *Мгц*. Допустимая мощность, рассеиваемая их коллекторным переходом, достигает 150 *мвт* (рис. 31).

В диффузионном транзисторе благодаря специально подобранному неоднородному распределению примесей в части базового слоя также создается внутреннее электрическое поле, ускоряющее движение носителей зарядов от эмиттера к коллектору.

Диффузионный метод получения p-n-переходов благодаря своей простоте и точности в настоящее время широко применяется при изготовлении не только транзисторов, но и диодов. При этом он стал применяться в сочетании с ранее разработанными способами получения высокочастотных транзисторов. В 1956 г. были опубликованы

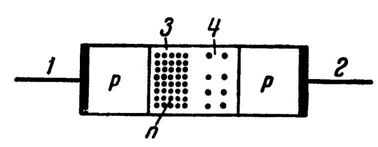


Рис. 30. Примерная характеристика неоднородного распределения примесей в диффузионном транзисторе.

1 — эмиттер; *2* — коллектор; *3* — сильнолегированная область; *4* — слаболегированная область.

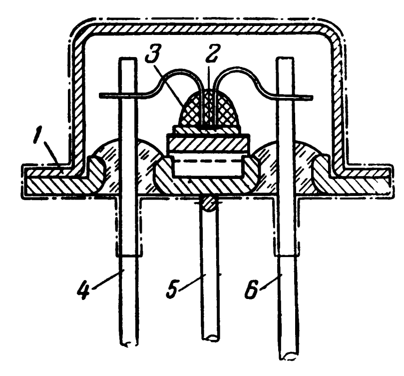


Рис. 31. Устройство диффузионных германиевых транзисторов П401, П402 и П403.

1 — колба; *2* — пластинка германия; *3* — закрепляющий состав; *4* — вывод базы; *5* — вывод коллектора; *6* — вывод эмиттера.

сведения о параметрах первых кремниевых диффузионных транзисторов на частоту генерирования до 30 *Мгц*, а в 1957 г. в печати появилось сообщение о разработке образца кремниевого и германиевого тетродов на предельные частоты генерирования соответственно 100 и 500 *Мгц*, изготовленных методами выращивания из расплава и диффузии примесей.

В ноябре 1957 г. в зарубежной периодической литературе было опубликовано описание диффузионно-сплавного метода изготовления плоскостных транзисторов с диффузионной базой, отличающегося от прежних методов изготовления диффузионных транзисторов большой простотой и рядом других преимуществ.

Сущность этого метода сводится к тому, что на поверхности пластинки германия p-типа плавится небольшое количество сплава, содержащего две примеси, например 1% сурьмы и 2% галлия. Коэффициент диффузии у сурьмы, вызывающей электронную проводимость германия, в 100 раз больше, чем у галлия. При нагревании сурьма быстро диффундирует, обгоняя галлий и образуя тонкий базовый слой n-типа. Примесь галлия хорошо растворяется в германии, сохраняя p-тип его проводимости и образуя эмиттерный слой. При этом ширина базы автоматически определяется разни-

цей глубин проникновения сурьмы и галлия и поэтому не зависит от глубины их вплавления,

В этом и заключается основное достоинство диффузионно-сплавного метода. Необходимо указать, что в Советском Союзе он бы разработан независимо и, по-видимому, ранее, чем в США, так как отечественные диффузионные транзисторы П401, П402 и П403 изготовляются с конца 1956 г. именно этим способом. Диффузионно-сплавной метод оказался очень перспективным для изготовления различных типов транзисторов, в том числе импульсных.

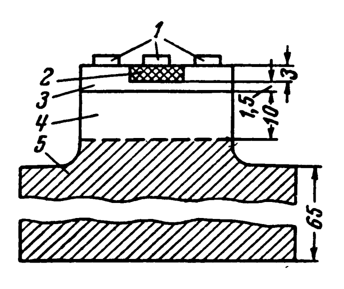


Рис. 32. Устройство кремниевого высокочастотного диффузионного тетрода мощностью 5 *вт* (размеры даны в микронах).

1 — золотые контакты; *2* — эмиттер; *3* — база; *4* — внутренний легированный слой *p*-типа; *5* — область коллектора.

В разработанном в 1953 г. поверхностно-барьерном транзисторе эмиттерный слой отличается слабой эффективностью. В 1957 г. этот транзистор был усовершенствован путем дополнительного введения в лунки и последующего вплавления диффузионно-сплавным методом небольших количеств легирующих примесей. Так появилась новая разновидность транзистора, названного микросплавным транзистором. В отличие от дрейфового транзистора он лучше работает в импульсном режиме, так как имеет значительно меньшее сопротивление в «запертом» состоянии.

Как известно, германиевые мощные транзисторы из-за нагрева коллекторного перехода могут работать при температуре оболочки порядка 40—50° С.

Однако переход на кремний, суливший расширение температурных пределов работы мощных транзисторов, тормозился из-за ряда серьезных технологических трудностей. Поэтому лишь в 1956 г. был изготовлен низкочастотный кремниевый транзистор, допускающий рассеивание на коллекторе мощности до 9 *вт*. Зато уже в следующем 1957 г. было объявлено об изготовлении кремниевого диффузионного транзистора мощностью 50 *вт*, а в начале 1958 г. появилось сообщение о 85-ваттном кремниевом транзисторе.

Выше было показано, что конструктивные собенности дрейфового транзистора принципиально допускают рассеяние на его коллекторном переходе повышенной мощно-

сти по сравнению с другими высокочастотными транзисторами.

Естественно, что это привлекло к дрейфовым транзисторам внимание исследователей и конструкторов. И действительно, в 1957 г. был описан экспериментальный мощный кремниевый тетрод, способный развивать мощность в 5 *вт* на частоте 10 *Мгц* в усилительном режиме (рис. 32).

Коэффициент его полезного действия в цепи коллектора не менее 40%, а коэффициент усиления мощности более 20 *дб*. Транзистор относится к классу дрейфовых триодов с переходами типа *p-n-i-p*, причем эмиттер и база получены диффузионным способом. Сообщалось также, что некоторые образцы транзисторов такого типа развивали в генераторном режиме на частоте 100 *Мгц* мощность до 1 *вт*.

Таким образом, благодаря успехам в разработке и освоении технологии изготовления дрейфовых транзисторов был сделан новый шаг в направлении использования потенциальных возможностей этих приборов.

Однако одна из стержневых задач полупроводниковой электроники — создание высокочастотных транзисторов, которые по принципу действия были бы подобно электронной лампе одинаково пригодны для усиления малых и больших мощностей, — остается еще проблемной задачей.

Пригодность дрейфового транзистора для работы на высоких частотах, как было показано ранее, определяется в большой степени воздействием электрического поля на электроны в той части базовой области, которая примыкает к коллектору.

Недолгая история развития транзисторов связана с неоднократными попытками создания приборов, управляемых электрическим полем.

Одной из наиболее известных является попытка разработки так называемого униполярного полевого (или канального) транзистора, предложенного в 1952 г. Шокли.

Как видно из рис. 33, униполярный полевой транзистор состоит из тонкой пластинки германия с проводимостью *n*-типа, окруженной полоской германия с проводимостью *p*-типа (показан в разрезе). К кольцевому *p-n*-переходу приложен отрицательный потенциал, под воздействием которого большинство носителей зарядов (электронов) оттеняется к центру пластинки и образуется широкий истощенный слой. Это явление эквивалентно уменьшению эффективного сечения пластинки, а следовательно, увеличению ее сопротивления.

К торцам пластинки *АБ* приложено постоянное напряжение. Поэтому через пластинку германия и нагрузочное сопротивление протекает постоянный ток, величина которого изменяется в соответствии с колебаниями отрицательного потенциала на кольцевом *p-n*-переходе. Входное сопротивление такого прибора равно обратному сопротивлению *p-n*-перехода и поэтому значительно выше, чем у обычного транзистора.

Однако униполярные полевые транзисторы не оправдали возлагавшихся на них надежд, так как их предельные частоты не превосходили единиц мегагерц.

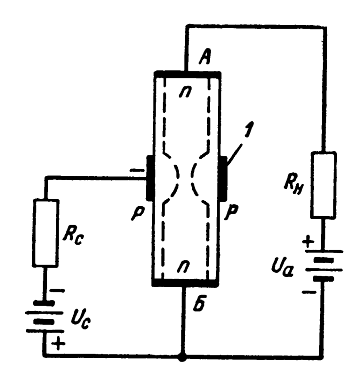


Рис. 33. Устройство и схема включения униполярного транзистора, управляемого полем.
1 — кольцевой *p-n*-переход.

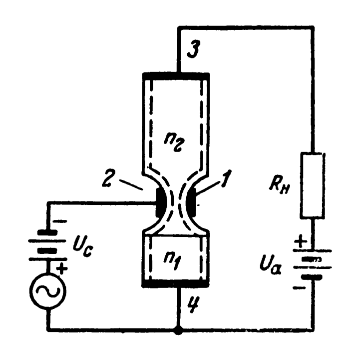


Рис. 34. Устройство и схема включения текнетрона.
1 — кольцо из индия; *2* — горловинка; *3* — анод; *4* — катод.

В начале 1958 г. во французской периодической печати появились многочисленные сообщения о разработке нового высокочастотного усилительного полупроводникового прибора, управляемого полем.

Название прибора — текнетрон — составлено из первых двух букв фамилии разработчика прибора — Тезнер, начальных букв слов, составляющих название национального исследовательского центра по радиосвязи — CNET — «Centre National d'Etudes de Telecommunications» и приставки рон.

Текнетрон создан в результате дальнейшего развития униполярного полевого транзистора Шокли. Он представляет собой миниатюрный стерженек из германия с проводимостью *n*-типа длиной 2 *мм* и диаметром 0,5 *мм* (рис. 34). На расстоянии, равном примерно одной трети длины стер-

женька, имеется горловинка, диаметр и длина которой одинаковы и равны всего 40 *мк*. На поверхность горловинки электролитическим способом нанесен тонкий слой индия. По утверждению авторов описаний технетрона этот кольцевой слой не создает резко выраженного *p-n*-перехода. Германиевый стерженек состоит из двух частей с различными удельными сопротивлениями, полученных путем последовательного вытягивания их из расплава и легирования различными количествами примесей.

Меньшая сильно легированная часть n_1 имеет очень малое удельное сопротивление, равное 0,005 *ом·см*, а бо́льшая часть n_2 — сравнительно большое удельное сопротивление, достигающее 15 *ом·см*.

В униполярном полевом транзисторе Шокли изменение эффективного сечения (канала) полупроводника под воздействием электрического поля носит линейный характер. В текнетроне же благодаря применению цилиндрического стержёнька германия это изменение имеет объемный характер и поэтому происходит значительно интенсивнее.

Схемы включения текнетрона и униполярного полевого транзистора Шокли аналогичны и, как видно из рис. 32 и 33, подобны схеме включения электронной лампы. Часть стерженька с низким удельным сопротивлением выполняет функции катода, а горловинка — управляющей сетки. При изменении напряжения смещения на горловинке (от —2 до —10 *в*) происходит соответствующее изменение сопротивления и емкости германиевого стерженька.

Входное сопротивление текнетрона достигает 3 *Мом*, выходное сопротивление — около 50 *ком*, а внутреннее сопротивление 1 *Мом*. Благодаря этому анодные характеристики текнетрона аналогичны соответствующим характеристикам пентода.

В отличие от обычных транзисторов текнетрон работает при относительно высоком анодном напряжении, находящемся в пределах от 60 до 90 *в*, а его анодный ток не превышает 3 *ма*.

Наиболее интересной особенностью текнетрона является рост крутизны его характеристики с увеличением частоты усиливаемого сигнала. Так, например, на частоте 300 *Мгц* крутизна характеристики равна 0,8 *ма/в*, достигая максимума, а на частоте 10 *Мгц* она не превосходит 0,1 *ма/в*.

Таким образом, по крутизне характеристики и анодным напряжению и току текнетрон близок к прямонакальным лампам. Особенности частотной характеристики текнетрона

определяются свойствами горловинки, которая по описанию изобретателя ведет себя как переменное сопротивление со многими отводами, соединяющими отдельные участки сопротивления параллельно с конденсаторами переменной емкости.

Образцы текнетрона в схеме усиления напряжения имели следующие параметры:

на частоте 150 *Мгц* усиление 14 *дб* в полосе 6,4 *Мгц*;
на частоте 285 *Мгц* усиление 13 *дб* в полосе 11,4 *Мгц*;
на частоте 454 *Мгц* усиление 9 *дб* в полосе 29 *Мгц*;
наибольшая мощность рассеяния 125 *мвт* и полезная мощность в режиме класса А от 15 до 30 *мвт*.

На низких частотах текнетрон работает плохо и поэтому является не конкурентом транзистора, а его дополнением для применения в высокочастотных усилительных устройствах.

По сообщениям французской печати дальнейшие разработки текнетронов ведутся в направлении повышения их рабочих частот до 1 000 *Мгц* при выходной мощности порядка нескольких ватт.

Со второй половины 1957 г. внимание специалистов было привлечено к идее нового, управляемого электрическим полем полупроводникового усилительного прибора, в котором нет обычной базовой области. Предложенный прибор получил название «спейсистор». Конструктивной основой спейсистора является плоскостной диод, между областями с дырочной и электронной проводимостью которого находится переходная зона пространственного заряда «ПЗ» (рис. 35). К диоду подключена батарея смещения так, что к области *p* присоединен минус, а к области *n* — плюс. Благодаря такому соединению в цепи батареи не возникает заметного тока, а область пространственного заряда подвергается воздействию сильного электрического поля. Спейсистор имеет еще два основных электрода в виде проволочек, введенных в зону «ПЗ»: «инжектор», установленный ближе к области *p*, называемой базой, и «модулятор», находящийся ближе к области *n*, называемой коллектором. При взгляде на спейсистор невольно возникает мысль о сочетании плоскостного диода с точечным транзистором. Однако это только отдаленное сходство.

Как на «инжектор», так и на «модулятор» подаются положительные потенциалы по сравнению с потенциалом области *p*. При этом «модулятор» является положительным по отношению к «инжектору». Принцип действия спейсисто-

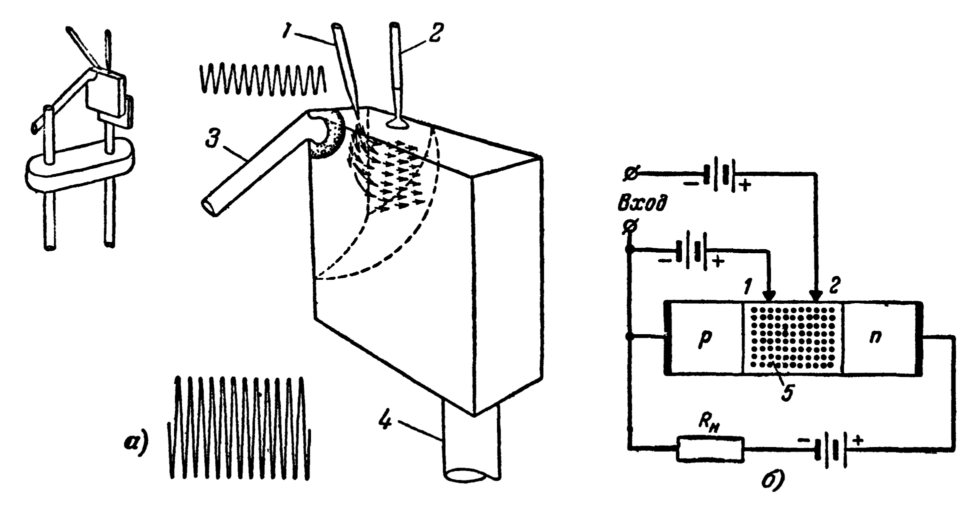


Рис. 35. Устройство (*а*) и схема включения (*б*) спейсистора.

1 — инжектор; *2* — модулятор; *3* — база; *4* — коллектор; *5* — пространственный заряд.

ра основан на том, что в области пространственного заряда «ПЗ» ток создается только движением электронов, которые эмиттируются «инжектором» и притягиваются коллектором. При этом электроны подвергаются воздействию электрического поля «модулятора», управляющего изменениями электронного потока из «инжектора» в соответствии с колебаниями входного напряжения, приложенного между областью *p* и «модулятором». Таким образом, «инжектор» выполняет роль катода, «модулятор» — сетки, а коллектор — анода электронной лампы.

Сообщалось, что усиление по мощности экспериментальных образцов доходило до 70 *дб*, усиление по напряжению — до 68 *дб*. Входное сопротивление составляет 30 *Мом* с возможностью его увеличения в дальнейшем, что позволит использовать такой прибор в обычных схемах, где до сих пор могли применяться только электронные лампы. Утверждается, что новый прибор будет способен усиливать сигналы на частотах до 10 тыс. *Мгц*, так как его входная емкость благодаря наличию зоны пространственного заряда очень мала (не превосходит 1 *пф*). Работа спейсистора (в отличие от транзистора) не зависит от времени жизни носителей зарядов. Поэтому для его изготовления возможно использование высокотемпературных полупроводниковых материалов, например, карбида кремния. В случае успеха это позволит резко повысить температурные пределы усилительных полупроводниковых приборов.

Сведения о технотроне и спейсисторе относятся к стадии их лабораторной разработки и пока не проверены, так как отработанные образцы таких приборов еще не выпущены. Но они наглядно характеризуют основную тенденцию в поисках путей создания новых высокочастотных полупроводниковых приборов.

Работы по изысканию новых полупроводниковых материалов, пригодных для работы в условиях высоких температур, ведутся непрерывно и за последние 2 года дали серьезные результаты. В 1957 г. были изготовлены диоды, в которых в качестве полупроводникового материала использовался карбид кремния. Такие диоды пригодны для работы при температуре от —75 до +650° С. Тогда же было сообщено о попытках применить для изготовления транзисторов новый полупроводниковый материал — арсенид галлия. Полагают, что транзисторы, изготовленные из арсенида галлия, будут работать при высоких окружающих температурах, достигающих 600—700° С.

Напомним, что монокристаллический кремний уже при температуре +250° С теряет свои полупроводниковые свойства, а предельная рабочая температура кремниевых приборов лежит значительно ниже этой величины.

К сожалению, однако, высокотемпературные материалы обладают как правило, плохими частотными свойствами.

Относительно недалекое будущее покажет, будут ли созданы полупроводниковые приборы, управляемые электрическим полем, где этот недостаток сможет быть преодолен.

Современные достижения техники изготовления полупроводниковых приборов позволили выдвинуть новую перспективную идею, значение которой трудно переоценить. По-видимому, в недалеком будущем окажется возможным изготовление методами полупроводниковой технологии комплексных полупроводниковых приборов, состоящих из ряда электронно-дырочных переходов, выполняющих функции усилительных триодов, выпрямительных диодов, сопротивлений, конденсаторов и даже источников питания.

При надлежащем соединении часть переходов может выполнять функции усилителя или другого схемного элемента, а несколько переходов, облучаемых светом, послужат источником энергии.

Лабораторные модели таких полупроводниковых элементов, получивших название «твердые» цепи, уже изготовлялись и имели вид небольших кусков полупроводниковых материалов. До практического использования этой идеи еще довольно далеко. Нет сомнения, однако, что ее реализация произведет революцию в технологии массовой радиоэлектронной аппаратуры.

19. БУДУТ ЛИ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ ЗАМЕНЕНЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ?

Ответ на этот вопрос с первого взгляда кажется очень простым. И не случайно в периодической печати можно часто встретить утверждение, что полупроводниковые приборы уже теперь успешно заменяют электровакуумные. Однако история развития полупроводниковых и электровакуумных приборов показала, что такая замена оказалась вовсе не простым делом.

Прошло 10 лет с момента появления первого точечного транзистора За это время транзисторы серьезно развились и стали многочисленным классом электронных усилитель-

ных и гетеродинных приборов, насчитывающим многие десятки разновидностей, выполняющих разнообразные функции. Но они не одержали еще решительной победы даже над приемно-усилительными лампами. Вспомним, что в 1917 г. — через 10 лет после изготовления первых усилительных электронных ламп — последние еще не нашли широкого применения в радиотехнической аппаратуре и находились лишь в начальной стадии своего развития.

Правда в то время сама радиотехника, несмотря на 22-летнюю историю, переживала переломный период, связанный с переходом на электронные лампы, которые еще не имели четко определившихся применений.

В настоящее время благодаря успехам радиоэлектроники области применений электронных приборов практически не ограничены. Поэтому полупроводниковые приборы могут развиваться значительно быстрее. Специализация приемно-усилительных ламп началась лишь в 30-х годах, через 20 с лишним лет после появления первой лампы. Полупроводниковые приборы вступили в период специализации в конце первого десятилетия своего существования. Для примера достаточно назвать такие специализированные типы транзисторов, как импульсные для схем переключения, парные, подобранные для работы в двухтактных схемах, двойные транзисторы, дрейфовые триоды и тетроды и др. В дополнение к уже упомянутым ранее разновидностям выпрямительных полупроводниковых диодов в последнее время стали появляться полупроводниковые приборы с тиратронными характеристиками (диоды с двойной базой и др.).

При сопоставлении основных свойств вакуумных и полупроводниковых электронных приборов часто, помимо бесспорных, уже упоминавшихся преимуществ полупроводниковых приборов (отсутствие накала и, как следствие этого, несравненно более высокая экономичность и мгновенная готовность к действию), отмечается также ненужность для них специального баллона и вакуума.

Высоко оценивается приспособленность транзисторов для работы при низких питающих напряжениях.

К преимуществам транзисторов относят также их миниатюрность и чрезвычайно высокую надежность, значительно превышающую надежность электронных ламп.

Рассмотрим, насколько соответствуют эти утверждения действительности.

Для нормальной работы транзисторов и полупроводниковых диодов вакуум действительно не нужен. Но если их

не помещать в герметичные оболочки, то через некоторое время из-за проникшей влаги параметры приборов станут неустойчивыми, а в дальнейшем они окажутся вообще неработоспособными.

В первые же годы после появления транзисторов американские фирмы выпустили несколько сот тысяч слуховых аппаратов для тугоухих на транзисторах, запрессованных в пластмассу. В результате недостаточной герметичности таких оболочек изготовленные аппараты сравнительно быстро стали терять усиление. Одновременно возрастал уровень собственных шумов. Пришлось срочно разрабатывать специальные герметичные оболочки для транзисторов и диодов.

В настоящее время все транзисторы и полупроводниковые диоды изготовляются в герметичных, главным образом в металлических (сварных) или стеклянных баллонах. Оказалось, однако, что проверить герметичность оболочки, пожалуй, сложнее, чем установить наличие вакуума. Поэтому некоторые изготовители подвергают транзисторы специальной откачке при помощи вакуумных насосов и наполняют после этого их оболочки инертным газом. Таким образом, полупроводниковые приборы нуждаются в герметичных баллонах так же, как и электронные лампы.

Работа при низких питающих напряжениях действительно является органической особенностью плоскостных транзисторов, в которых носители зарядов перемещаются путем диффузии. Именно поэтому транзисторы оказались грозными соперниками прежде всего прямонакальным лампам, питаемым от батарей. С 1956 г. в слуховых аппаратах, выпускаемых за рубежом, электронные лампы больше не применяются. Количество портативных радиоприемников на транзисторах также стало в последнее время быстро возрастать. По данным периодической печати, в 1957 г. за рубежом выпускалось свыше 40 типов таких приемников для диапазонов длинных и средних волн.

Даже по сравнению с наиболее экономичными прямонакальными лампами, маломощные плоскостные транзисторы потребляют примерно в 6 раз меньшую мощность. В связи с этим в печати недавно появились сообщения о возможности разработки аппаратуры на транзисторах, питаемых за счет энергии, излучаемой мощными местными передатчиками.

Излучение мощной местной радиостанции через антенну и специальный фильтр попадает на полупроводниковый

выпрямитель, затем выпрямленный ток используется для питания устройства и зарядки резервного аккумулятора.

В периодической печати США обсуждаются проекты маломощных передатчиков на транзисторах для искусственных спутников Земли, так как благодаря своей экономичности такие передатчики смогут работать значительно дольше ламповых.

Это наглядно видно из следующей сравнительной таблицы данных двух передатчиков (на лампах и транзисторах) мощностью по 0,5 *вт* каждый, рассчитанных для работы в диапазоне 108 *Мгц*.

Основные данные	Схема на лампах	Схема на транзисторах
Напряжение коллектора, *в*	—	20
Суммарный коллекторный ток выходного каскада, *ма*	—	45
Потребляемая мощность в коллекторной цепи выходного каскада, *вт*	—	0,9
К. п. д. коллекторной цепи, %	—	58
Мощность, потребляемая цепью эмиттера, *мвт*	—	30
Напряжение анода, *в*	120	—
Ток анода, *ма*	32	—
Напряжение экранирующей сетки, *в* . . .	120	—
Ток экранной сетки, *ма*	5	—
Напряжение накала, *в*	2,25	—
Ток накала, *ма*	80	—
Суммарная мощность, потребляемая выходным каскадом, *вт*	4,62	0,93
Общий к. п. д., %	10,8	53,8

Весьма наглядно сравнение экономичности изготовленных в Советском Союзе образцов радиоприемников и телевизоров на полупроводниковых приборах с образцами аналогичной ламповой аппаратуры. Батарейные приемники «Искра» (ламповый) и «Кристалл», развивающие выходные мощности 0,15 и 0,1 *вт*, имеют к. п. д. соответственно 10 и 35%.

Образец телевизионного приемника на полупроводниковых приборах потребляет всего 12 *вт* — почти в 20 раз меньше, чем телевизор КВН-49. Однако если в телевизоре КВН-49 применено только 16 электронных приборов, то в телевизоре на полупроводниковых приборах число их достигает уже 47, в том числе 30 транзисторов и 17 диодов.

Таким образом, в современных схемах одну лампу могут заменить только два или даже три полупроводниковых прибора, стоимость которых еще довольно высока. Осложняющим обстоятельством здесь является большой разброс параметров полупроводниковых приборов от экземпляра к экземпляру, значительно превышающий разброс параметров, допускаемый для электронных ламп. Изготовить транзистор с требуемыми параметрами труднее, чем электронную лампу. Достаточно напомнить, что толщина базы плоскостного маломощного транзистора достигает сотых и даже тысячных долей миллиметра, причем малейшее отклонение от заданной величины приводит к значительному изменению свойств прибора. Учет этой, а также других особенностей транзисторов и приводит к значительному увеличению количества электронных приборов при переходе на транзисторы. При этом следует иметь в виду, что с увеличением количества электронных приборов в устройстве соответственно возрастает число конденсаторов, сопротивлений и других радиодеталей, входящих в схему.

Вопрос о сравнительной надежности электронных ламп и полупроводниковых приборов довольно часто и оживленно обсуждается в периодической печати. При оценке надежности электронных приборов обычно исходят из величины срока службы и устойчивости против внешних воздействий, в том числе против колебаний температуры окружающей среды, ударов и вибрации.

Срок службы любых электронных приборов, в том числе полупроводниковых, определяется двумя основными факторами: во-первых, конструктивными особенностями и технологией их изготовления и, во-вторых, соблюдением условий эксплуатации. Наличие нити накала или подогревателя является основным уязвимым местом электронной лампы. Установлено, что 60% выходов ламп из строя происходит из-за изменений напряжения подогревателя.

Зависимость срока службы электронной лампы от напряжения накала хорошо иллюстрируется табл. 2.

Поэтому в ответственных случаях напряжение накала ламп должно быть стабилизировано. Серьезное влияние на срок службы электронной лампы оказывает величина мощности, рассеиваемой ее анодом ($P_а$), что наглядно видно из табл. 3.

При соблюдении правил эксплуатации, которые на практике часто нарушаются, хорошо изготовленная электронная лампа будет работать в течение заданного срока

Таблица 2

Проценты от номинального напряжения накала	Проценты от номинального срока службы
100	100
110	40
120	20
140	4,5

Таблица 3

Проценты от $P_{a.\ номин}$	Проценты от номинального срока службы
0	200
50	150
100	100
150	75
200	40

службы. Это подтверждается тем, что специальные надежные электронные лампы работают десятки тысяч часов в ответственных установках.

Однако катод электронной лампы при любых условиях эксплуатации рано или поздно истощается, как бы хорошо прибор ни был изготовлен.

Принципиальная неистощимость эмиттера транзистора обеспечивает последнему потенциальную способность работать неограниченно долго. Однако реализация этой способности связана с соблюдением ряда очень жестких условий, к которым прежде всего относятся применение материалов сверхвысокой чистоты, строжайшая дозировка микроскопических примесей в полупроводниковых материалах и особая чистота обработки поверхностей *p-n*-переходов. Выполнение этих условий связано с настолько большими технологическими трудностями (особенно при изготовлении кремниевых приборов), что полупроводниковые приборы, выпускавшиеся до настоящего времени, еще не обладали должной стабильностью работы и характеризовались сравнительно высоким уровнем собственных шумов. В этой связи представляет интерес статья Суси «Обзор преимуществ применения полупроводниковых приборов в самолетной электронной аппаратуре», опубликованная в 1957 г. в июньском номере «Canadian Aeronautical Journal». Полемизируя с утверждением, что полупроводниковые приборы могут заменить 88% электронных ламп в самолетной аппаратуре, что позволит в 5 раз повысить надежность ее работы, он писал: «Уменьшение размеров и веса самолетной электронной аппаратуры в 2 или 3 раза достигнуто благодаря лучшему конструированию ее и переходу не на полупроводниковые приборы, а на сверхминиатюрные лампы, впаиваемые в схемы. Более того, 100-кратное уменьшение количества неисправностей в последних разработках достигнуто

за счет лучшего конструирования, а не применения полупроводниковых приборов.

Предстоящее широкое применение полупроводниковых приборов в самолетной и другой электронной аппаратуре, очевидно, и отмечаемые их преимущества, вероятно, будут даже еще больше. Однако в настоящее время вряд ли следует возлагать очень большие надежды на полупроводниковые приборы, закрывая в то же время глаза на свойственные им недостатки и трудности применения их в обычных схемах. Эти приборы еще не столь надежны и стабильны по своим параметрам, чтобы ими можно было заменить, например, высококачественные электронные лампы в усилителях подводного телефонного кабеля через Атлантический океан, средний срок службы которых оценивается, примерно, в 40 лет».

Миниатюрность действительно одна из особенностей конструкции полупроводникового прибора, но она не относится к числу их решающих преимуществ. Компактность аппаратуры определяется не столько размерами электронных приборов, сколько объемом, определяемым всеми ее компонентами, а также блоком питания. Благодаря низким питающим напряжениям и небольшой мощности, потребляемой аппаратурой на полупроводниках, возможно применение малогабаритных радиодеталей и портативных источников питания. Именно этим определяется уменьшение габаритов аппаратуры, достигаемое при переходе на полупроводниковые приборы.

Стремление использовать реально достигнутые преимущества полупроводниковых приборов привело к разработке специальных низковольтных ламп для совместной работы с выходными транзисторами (см. раздел 15) в автомобильных приемниках, где благодаря этому стало возможным непосредственное питание от аккумулятора без преобразователя и достигается серьезное уменьшение потребляемой энергии.

Совместное использование электронных полупроводниковых и вакуумных приборов является, конечно, компромиссным решением.

В известной мере оно показывает, что хотя позиции приемно-усилительной электронной лампы поколеблены, но все же еще сохраняются.

Что же мешает более успешному внедрению полупроводниковых приборов? Прежде всего низкие частотные пределы

транзисторов и сильная зависимость величины устойчивого усиления каскада на транзисторах от частоты. На повышенных частотах, близких к критическим, эта величина уменьшается примерно обратно пропорционально частоте. Поэтому транзисторы наиболее устойчиво работают, на частотах, в несколько раз меньших критической. В настоящее время уже разработан ряд типов высокочастотных транзисторов (см. раздел 18), работы в этом направлении в различных странах продолжаются с большим размахом и приводят к появлению все новых и новых конструкций высокочастотных транзисторов и частым изменениям способов их изготовления. Далека от завершения и работа по созданию температуроустойчивых и малошумящих транзисторов. Поэтому в отличие от электронных ламп, где основные типы приборов (кроме сверхвысокочастотных) уже установились, недавно созданные полупроводниковые приборы быстро устаревают.

Все это затрудняет более широкое применение полупроводниковых приборов, и ведущие фирмы в капиталистических странах воздерживаются пока от автоматизации технологических процессов производства транзисторов. Тем не менее выпуск полупроводниковых приборов быстро растет.

Сведения о количественном выпуске транзисторов стали публиковаться лишь недавно. В 1957 г. было сообщено, что в 1955 г. промышленность США выпустила всего 3,6 млн. транзисторов, в 1956 г. их выпуск превысил 12 млн. шт., а за первую половину 1957 г. — 11 млн. шт. Производство германиевых и кремниевых диодов в 1956 г. достигло в США 35 млн. шт.

Для сравнения небезынтересно указать, что к 1956 г. во всем мире было произведено 7 млрд. электронных ламп, т. е. по три лампы на каждого жителя земного шара. Из них в эксплуатации находилось более 2 млрд. ламп. В справочниках в 1956 г. было описано 18,5 тыс. типов электронных ламп, из которых многие были близкими по параметрам и конструкции. Однако темпы роста производства полупроводниковых приборов говорят сами за себя.

Оценивая перспективы развития производства полупроводниковых приборов, зарубежная деловая печать указывала в 1957 г.: «Есть основание предполагать, что выпуск транзисторов в 1965 г. достигнет величины, характерной в настоящее время для выпуска электронных ламп, так как успехи в улучшении рабочих характеристик транзисторов увеличивают области их применения».

Непрерывно развиваясь и улучшаясь, полупроводниковые приборы смогут заменить в дальнейшем не только прямонакальные лампы, но и ряд типов современных подогревных ламп. Анализ развития высокочастотных транзисторов дает основание считать, что и в этой области будут достигнуты новые серьезные успехи. Не исключена также возможность появления гибридных электронных приборов, сочетающих преимущества вакуумных и полупроводниковых приборов. Многое зависит от решения проблемной пока задачи создания усилительных и генераторных полупроводниковых приборов, управляемых электрическим полем. Создание таких приборов, пригодных для работы на частотах порядка сотен мегагерц с мощностью, достигающей хотя бы нескольких ватт, позволило бы полупроводниковым приборам стать самыми массовыми электронными приборами.

Поиски новых принципов усиления и генерирования колебаний и путей их реализации не ограничиваются областью полупроводниковых приборов и продолжаются в различных направлениях. Ярким примером этого являются исследования и разработки квантовомеханических молекулярных и атомных генераторов и усилителей (см. раздел 17), открывших новое направление в сверхвысокочастотной технике.

Интересны также исследования нового направления в радиоэлектронике сверхнизких температур, которые привели к созданию криотронов, используемых в качестве элементов памяти электронных вычислительных машин и элементов переключающих схем, а также криотронных усилителей. Действие этих приборов основано на использовании влияния магнитного поля на момент возникновения эффекта сверхпроводимости в различных материалах при температурах, близких к абсолютному нулю.

Другое самостоятельное направление характеризуют разработки жидкостных ламп, так называемых «солионов» — миниатюрных чувствительных преобразователей, реагирующих на изменения температуры, давления, света, звука и ускорения. Действие этих приборов основано на движении ионов иода в растворе иодистого калия между двумя электродами. Питающее напряжение очень невелико — около 1 *в* при токе порядка нескольких десятков микроампер.

В последние годы все большее внимание уделяется практическому использованию гальваномагнитного эффекта Холла в полупроводниках, открытого еще в 1879 г. Если проводник, через который идет электрический ток, поместить

в магнитное поле так, чтобы оно было направлено перпендикулярно приложенному электрическому полю, то в проводнике возникнет поперечная разность потенциалов, величина которой пропорциональна произведению тока на напряженность магнитного поля. При этом возникшая э. д. с. направлена перпендикулярно им обоим.

Эффект Холла достигает наибольшей величины в полупроводниках, носители тока в которых отличаются большими подвижностями.

Приборы, основанные на использовании эффекта Холла, получили название датчиков Холла и оказались весьма удобными для измерений напряженности постоянных и переменных магнитных полей, величины тока и мощности в цепях постоянного и переменного токов. Эффект Холла можно легко использовать для преобразования постоянного тока в переменный, а также для модуляции и детектирования сигналов переменного тока.

Эффект Холла может быть использован также как для создания идеального квадратичного детектора, характеристика которого имеет вид параболы, так и для устройства идеального линейного детектора, обладающего в отличие от ламповых или полупроводниковых детекторов, являющихся нелинейными элементами, строго прямолинейной характеристикой.

В 1955 г. с помощью датчика э. д. с. Холла из сурьмянистого индия было впервые получено усиление мощности сигнала, а в дальнейшем и генерирование электрических колебаний с частотой порядка 1—2 *Мгц*.

Различные приборы, основанные на использовании эффекта Холла в полупроводниках, находят все большее применение. Потенциальные возможности этого направления еще далеко не изучены.

Существуют и развиваются также и другие направления, основанные на использовании различных нелинейных элементов.

Однако вакуумные электронные приборы, отличающиеся огромным многообразием разновидностей и выполняемых ими функций, занимают прочные позиции в радиоэлектронике и продолжают успешно развиваться, раздвигая температурные и частотные барьеры.

Дальнейшее развитие полупроводниковых приборов, несомненно, приведет к серьезному вытеснению ряда типов приемно-усилительных и маломощных генераторных ламп.

Недалекое будущее покажет, сможет ли полупроводнико-

вая электроника значительно продвинуться в сторону высоких частот и температур, а следовательно, и мощностей.

Нет сомнения в том, что вакуумная и полупроводниковая электроника и в дальнейшем будут не исключать, а дополнять друг друга. Но в многоламповой и портативной аппаратуре различных назначений, всюду, где применение полупроводниковых приборов, в первую очередь благодаря низким питающим напряжениям и непревзойденной экономичности, сулит резкое снижение веса и габаритных размеров, они станут основными электронными приборами. Многое в этом направлении уже достигнуто, но еще больше предстоит сделать.

ЛИТЕРАТУРА

Шамшур В. И., Первые годы советской радиотехники и радиолюбительства, Госэнергоиздат, 1954.

Пятьдесят лет радио, Госэнергоиздат, 1945.

Коваленко В. Ф., Введение в электронику сверхвысоких частот, Изд. «Советское Радио», 1955.

Федотов Я. А., Кристаллические триоды, Госэнергоиздат, 1955.

Элементы радиотехники (под редакцией А. М. Бройде), Госэнергоиздат, 1955.

Соминский М. С., Полупроводники и их применение, Госэнергоиздат, 1955.

Кристаллические выпрямители и усилители (под редакцией проф. С. Г. Калашникова), Изд. «Советское Радио», 1954.

Бройде А. М., Радиотехнические устройства (общий курс), Госэнергоиздат, 1949.

Кобленц А. и Оуэнс Г., Транзисторы (теория и применения), перевод с английского под редакцией проф. В. П. Жузе, Изд. иностранной литературы, 1956.

Полупроводниковые приборы и их применения (сборник статей под редакцией Я. А. Федотова), Изд. «Советское Радио», 1956.

Бройде А. М., Справочник по электровакуумным и полупроводниковым приборам, Госэнергоиздат, 1957.

Ши Р., Полупроводниковые триоды и их применение (перевод с английского под редакцией А. В. Красилова), Госэнергоиздат, 1957.

Полупроводники в науке и технике, Том 1, Изд. Академии Наук СССР, 1957.

СОДЕРЖАНИЕ

Цена 1 р. 80 к.